

Institutionen för vatten och miljö



**”För var dag blir det bättre men bra lär
det aldrig bli”**

Försurning i sjöar och vattendrag 2014

Jens Fölster, Salar Valinia, Leonard Sandin, Martyn N Futter

SLU, Vatten och miljö: Rapport 2014:20

Referera gärna till rapporten på följande sätt:

Fölster, J., S. Valinia, L. Sandin, and M.N. Futter. 2014. "För var dag blir det bättre men bra lär det aldrig bli". Försurning i sjöar och vattendrag 2014. SLU, Vatten och miljö: Rapport 2014:20

Titel: Citat ur "Ballad på en soptipp" av Cornelis Vreeswijk

Omslagsfoto: Mört (Foto: Mikael Östlund)

Tryck: Endast digitalt

Tryckår: 2014

Kontakt

Jens.Folster@slu.se

<http://www.slu.se/vatten-miljo>

Förord

Denna rapport har som syfte att tjäna som underlag till den fördjupade utvärderingen av miljömålet ”Bara naturlig försurning” och utgör redovisning av två projekt genomförda på uppdrag av Naturvårdsverket enligt överenskommelser 2251-14-003 och 2251-14-004.

Författarna är forskare på Institutionen för vatten och miljö på SLU inom området som har med vattenkvalitet att göra. Institutionen är utförare av stora delar av den nationella miljöövervakningen i sjöar och vattendrag och är tillsammans med IVL delaktiga i utvecklingen av bedömningsgrunder för försurning och i beräkning av kritisk belastning för Sveriges rapportering enligt Luftvårdskonventionen. Flera av författarna har tagit fram motsvarande underlag till tidigare fördjupade utvärderingar av miljömålet Bara naturlig försurning. Rapporten har interngranskats av Simon Hallstan på samma institution.

Innehållsförteckning

Sammanfattning	5
Summary	7
Introduktion.....	9
Dataunderlag	11
Metoder för utvärderingen	12
Trender i vattenkemi	14
Sjöar.....	14
Vattendrag	17
Biologisk återhämtning	21
Mörtens återkomst.....	24
Försurningstillståndet i Sveriges vatten	27
Sjöar.....	27
Felkällor i försurningsberäkningarna av försurning	31
Vattendrag	33
Överskridande av kritisk belastning.....	34
När når vi målet?	36
Kunskapsbehov	37
Referenser	38

Sammanfattning

Stora utsläppsminskningar av försurande svavel de senaste decennierna har lett till att svaveldepositionen nu är tillbaka på samma nivåer som för 100 år sedan. Detta har åtföljts av minskad surhet i sjöar och vattendrag och tecken på biologisk återhämtning. Samtidigt är många vatten fortfarande försurade och uppnår därmed inte kravet god ekologisk status i EUs ramdirektiv för vatten (WFD). Försurningsproblemet omfattning motiverar att "Bara naturlig försurning" är ett av Sveriges 16 miljömål.

Denna rapport är en uppföljning av två av försurningsmålets preciseringar om att det försurande nedfallet inte ska överskrida den kritiska belastningen för vad naturen tål och att Sveriges sjöar och vattendrag ska uppnå minst god ekologisk status enligt WFD. Trender av vattenkemi presenteras från försurningskänsliga sjöar och vattendrag inom den nationella och regionala miljöövervakningen. Bedömningen av andelen försurade sjöar och överskridande av kritisk belastning baserar sig på miljöövervakningsprogrammet med sjöar i omdrev. Utvärderingen baserar sig på en indelning i fyra regioner med olika försurning som följer länsgränser och Högsta kustlinjen. Bedömningen av biologisk återhämtning från försurning baserar sig på en litteraturstudie. En utvärdering av historisk och nutida förekomst av mört som indikator på återhämtning från försurning presenteras också.

Vattenkemiska trender analyserades i jonsvaga trendstationer med $ANC < 0,3$ mekv/l (ANC = syraneutraliserande förmåga). Urvalet gav 95 sjöar med tidsserier 1988-2013. Huvuddelen av sjöarna hade ursprungligen valts för att vara referenser till kalkningsverksamheten och lämpar sig därför väl för att studera återhämtning från försurning. Sjöarna saknar större påverkan från punktkällor och jordbruk så variation i klimat och deposition är därmed de främsta orsakerna till förändring. För vattendragen avgränsades data till perioden 1998-2013 för att få tillräckligt många stationer för en regional analys, 64 stycken. Vattendragen har en mer heterogen sammansättning, med allt från små skogsbäckar till inlandsstationer i de stora älvarna.

Sulfathalten och ANC minskade i sjöar i hela landet 1988-2013. En viss utplaning av trenden har skett, men minskningen har fortsatt även de senaste åren trots att depositionsminskningen planat ut. I södra halvan av Sverige minskade även halten baskatjoner (Ca, Mg, Na och K), vilket kan tolkas som en effekt av minskat försurningstryck. Halten naturligt organiskt kol (TOC) ökade i sjöar hela landet förutom i Norrlands inland. I den mest försurningspåverkade sydvästra delen av landet ökade alkalinitet och pH. En signifikant pH-ökning noterades även i Norrlands inland, men det har troligen naturliga orsaker.

Ett urval av de 57 suraste sjöarna visade att förekomsten av pH-värden under 5,6 har minskat. Detta värde brukar anges som tröskelvärde för förekomst av mört, och resultaten tyder på att det finns kemiska förutsättningar för en biologisk återhämtning i många sjöar.

Även i vattendragen minskade sulfathalten i hela landet. Få signifikanta trender noterades för övriga parametrar, delvis på grund av de 10 år kortare tidsserierna jämfört med sjöarna. En signifikant minskning av halten baskatjoner noterades i sydvästra Sverige liksom ökande TOC-halter i sydvästra samt östra och mellersta

Sverige. I Norrlands inland ökade alkaliniteten signifikant, troligen på grund av naturlig klimatstyrd variation. I tre sura bäckar ökade förekomsten av pH-värden över 5,6.

En trendanalys av bottenfauna i sjöar och vattendrag i Europa och Nordamerika visade på ökad biodiversitet kopplat till minskande sulfathalter, med särskilt tydliga trender i Sverige. Samtidigt visar fördjupande studier på komplexiteten i kontrollen av biodiversiteten vilket försvårar att entydigt koppla trenderna till återhämtning från försurning.

En undersökning av mörtbeståndens utveckling de senaste ca. 100 åren i 19 sjöar där mört försvunnit under försurningsperioden visade på en viss återhämtning från försurning, delvis på grund av kalkning. I 11 av sjöarna hade mörten kommit tillbaka. Av dessa var 10 kalkade. Mörten hade bara återkommit i 1 av 3 okalkade sjöar.

År 2010 var 10 % av Sveriges sjöar > 1 ha försurade. Bedömningen baseras på bedömningsgrunderna och innebär en minskning av pH-värdet med mer än 0,4 enheter sedan 1860 enligt geokemisk modellering (MAGIC). För kalkade sjöar beräknades de vattenkemiska parametrarna om för att ta bort effekten av kalkning innan bedömningen gjordes. Tillståndet innebär en återhämtning från 17 % försurade sjöar 1990. Prognoser för 2020 visar inte på någon ytterligare återhämtning. Försurningspåverkan är störst i sydvästra Sverige, 47 % av sjöarna, medan den är minst i Norrlands inland, 2 %. En kritisk granskning av bedömningen visar att bristande kunskap om dynamiken för svavel och kol ger en viss risk för överskattning av försurningen. Risken är störst i Norra Sverige där depositionen är tillbaka på nivåer nära bakgrundshalterna och där små fel därmed kan få stor betydelse.

Den kritiska belastningen av försurande ämnen för sjöar överskreds på 17 % av Sveriges areal 2010. Det är en avsevärd minskning sedan 1980 då 58 % av arealen hade ett överskridande. År 2020 förväntas överskridandet vara ner på 10 % om alla beslutade åtgärder genomförs i Europa och inom den internationella sjöfarten.

Beräkningarna av försurningspåverkan och överskridande av kritisk belastning visar på en omfattande förbättring av miljötillståndet med minskad försurning och minskat överskridande av kritisk belastning de senaste decennierna. Samtidigt visar prognoserna inte på någon fortsatt förbättring. Det innebär att med dagens miljömålsformulering, beräkningsmodeller och markanvändning går miljömålet inte att uppnå.

Summary

Large emission reductions in recent decades have resulted in the same level of acidifying sulphur deposition as occurred 100 years ago. These emission reductions were followed by less acidity in lakes and streams and signs of biological recovery. However, many surface waters are still acidified and thus fail to achieve EU Water Framework Directive (WFD) mandated Good Ecological Status (GES). The magnitude of the ongoing acidification problem highlights the need for "Natural Acidification Only" as one of Sweden's 16 environmental objectives.

This report is an assessment of the scope of surface water acidification in Sweden. Specifically, it reports the degree to which acid deposition exceeds the critical load for surface water acidification mandated by the "Natural Acidification Only" environmental objective and evaluates whether or not lakes and streams achieve at least GES under the WFD acidification-related criteria. Trends in water chemistry are presented from acid-sensitive lakes and rivers within the national and regional environmental monitoring programmes. The assessment of the proportion of acidified lakes and exceedence of critical load is based on data from the national lake survey. The evaluation has been done for four regions with different acidification pressures following county boundaries and the highest coastline. The assessment of biological recovery is based on published literature and a special study of historical and contemporary presence of roach as an indicator of recovery from acidification.

Water chemistry trends were analysed using data from acid sensitive lakes with $\text{ANC} < 0.3 \text{ mEq / L}$ (ANC = acid neutralizing capacity). The selection resulted in 95 lakes with time series from 1988 to 2013. Most of the lakes were originally selected as references for the liming program and are therefore well suited for the study of recovery from acidification. For watercourses, data was delimited to the time period 1998-2013 in order to get enough stations for a regional analysis (64 streams). Watercourses have a heterogeneous composition ranging from small forest streams to the inland stations in large rivers.

Sulphate concentrations and ANC declined in lakes across the country from 1988 to 2013. A slight flattening of the trends occurred, but declines have continued in recent years even though deposition has levelled off. In the southern half of Sweden base cation concentrations also declined which is consistent with decreased acidification pressure. Concentrations of naturally occurring organic carbon (TOC) increased in lakes throughout the country except in the far north. In the most acidified southwestern part of the country, alkalinity and pH increased. A significant pH increase was also observed in lakes in the northern interior of Sweden. This increase probably had natural causes.

Analysis of the 57 most acidic lakes in the data set showed that the occurrence of pH values below 5.6 has declined over time. A pH value of 5.6 is usually stated as a threshold for the presence of roach. Thus, the water chemistry results suggest that there are chemical conditions conducive to biological recovery in many lakes.

Sulphate concentrations decreased in watercourses across the entire country. Significant decreases in base cation concentrations were noted in southwest Sweden, as well as increasing TOC concentrations in southwest, eastern and central Sweden. In the northern interior, alkalinity increased significantly, probably due to natural cli-

mate-driven variation. Three acid streams showed increasing frequency of pH values above 5.6. Few significant trends were noted for the other parameters, in part due to the 10 year shorter time series compared to lakes.

A review of trend analyses of benthic fauna in lakes and streams in Europe and North America showed increased biodiversity was linked to decreasing sulphate levels, with particularly clear trends in Sweden. However, deeper analysis emphasised the complexity of controls on biodiversity which make it difficult to unequivocally link observed trends in benthic fauna to recovery from acidification.

An investigation of trends in the presence of roach during the last ca. 100 years in 19 lakes where roach disappeared during the acidification period showed a slight recovery from acidification, partly due to liming. In 11 of the lakes, roach had returned. Of these 10 were limed. Roach had only reappeared in 1 of 3 unlimed lakes.

In 2010, 10 % of Sweden's lakes > 1 ha were classified as acidified. The assessment is based on the official Ecological Quality Criteria and involves an estimated decrease in pH of more than 0.4 units since 1860 according to geochemical modelling with MAGIC. For limed lakes, chemistry without liming was estimated before the assessment was made. The state means a recovery from 17 % acidified lakes in 1990. Projections for 2020 indicate no further recovery. The impacts are greatest in southwest Sweden where 47% of the lakes have been acidified and lowest in the northern interior where only 2% were acidified. A critical review of the assessment shows that lack of knowledge about the dynamics of sulphur and carbon led to an overestimation of the degree of acidification. The risk of overestimation is greatest in northern Sweden, where acidifying deposition has returned to levels close to background levels and where small errors can thus be of great importance.

In 2010, 17 % of Sweden's land received excessive acidifying deposition for surface water. This is a significant reduction since 1980, when 58 % of the area had an exceedance in deposition. In 2020, the expected exceedance will be down 10 % if all decisions on reductions of emissions are carried out in Europe and for international shipping.

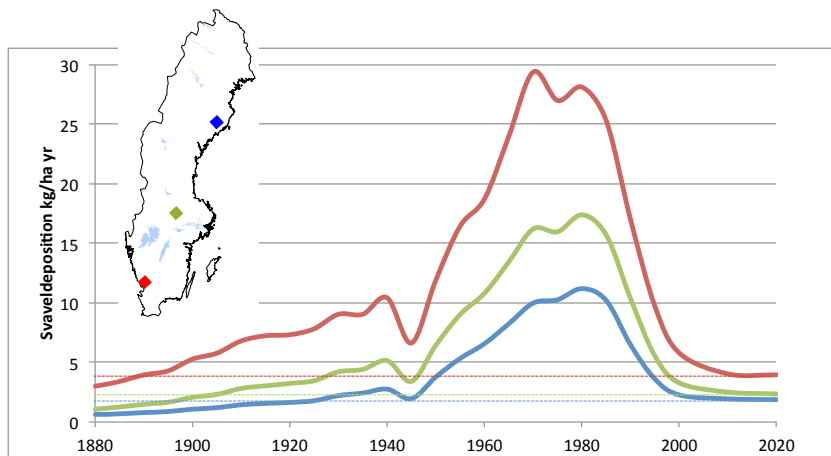
Trends in both estimates of acidification and exceedance of critical loads for surface waters show a comprehensive improvement in environmental conditions. Meanwhile, forecasts suggest no further improvements. That means that with today's environmental targets and current land management practices, Swedish Environmental Objectives and EU WFD Good Ecological Status will not be achieved for all lakes and watercourses.

Introduktion

Försurning av sjöar och vattendrag är en av de mest omfattande formerna av miljöpåverkan som drabbat Sverige med avseende på utbredning och graden av skada. Försurningen har orsakat fiskdöd, utslagning av bottenlevande organismer och på andra sätt förändrat ekosystemens funktion i en stor andel av Sveriges sjöar och vattendrag. Påverkan har varit störst i sydvästra Sverige där försurningstrycket varit störst, men försurningens effekter har varit påtagliga även långt upp i landet. Försurningens effekter har lindrats genom kalkning och det statliga bidraget till kalkningsverksamheten utgör den största enskilda miljövårdssatsningen i Sverige. Anslaget till spridning av kalk ligger för närvarande på drygt 125 miljoner kronor per år och sedan starten 1983 har kalkningsanslaget förbrukat cirka 5 miljarder kronor.

Försurningen beror främst på nedfall av försurande svavel och kväve där svavlet står för den allra största delen. Huvuddelen av svaveldepositionen kommer som långväga transporterade föroreningar, främst från övriga Europa och internationell sjöfart. Redan när sambandet mellan svavelnedfall och försurning uppmärksammades i slutet av 1960-talet införde Sverige begränsningar av svavelutsläppen. Sverige var också pådrivande inom FN:s luftvårdskonvention som bildades 1979 och vars arbete bidragit till att minska utsläppen. Under 1985 skrevs det första svavelprotokollet under av konventionens medlemsländer vilket förband dem att minska utsläppen med 30 % jämfört med 1980. Under 1994 skrevs nästa svavelprotokoll under som istället kopplade utsläppsminskningarna till den kritiska belastningen, det vill säga hur mycket ekosystemen långsiktigt tål utan att ta skada. Detta koncept har sedan dess varit vägledande för såväl arbetet inom luftvårdskonventionen som det svenska miljömålsarbetet. Senare protokoll (Göteborgsprotokollet 1999 med revidering 2012) har även omfattat kväve och andra luftföroreningar. Arbetet inom luftvårdskonventionen utgör ett gott exempel på hur miljöövervakningsdata och vetenskaplig kunskap kan ligga till grund för beslut som leder till minskad belastning på miljön. Förutom det politiska arbetet med att införa utsläppsbegränsningar har strukturomvandlingarna av industrin i Västeuropa på 1980-talet och i Östeuropa på 1990-talet haft stor betydelse för att det sura nedfallet minskat kraftigt de senaste decennierna. Idag är svaveldepositionen bara en sjundedel av vad den var på 1980-talet och är därmed nere på samma nivåer som för över hundra år sedan (Figur 1). Depositionsminskningarna har följts av vattenkemiska trender som visar på en minskad försurning (Futter m.fl. 2014).

Samtidigt som minskningarna av det försurande nedfallet kan ses som en framgångssaga visar beräkningar att kritisk belastning överskrids på stora arealer och att sjöar och vattendrag fortfarande är försurade (Naturvårdsverket 2012). Beräkningarna visar också att skogsbrukets försurande effekt fått allt större betydelse för försurningen jämfört med depositionen, som minskar allt mer. Detta förstärks av att skogsbrukets försurning antas öka med ökande uttag av grenar och toppar för biobränsle.



Figur 1. Depositionsutvecklingen vid tre rutor i Sverige. Data från EMEP.

Denna rapport omfattar en uppföljning av de två av fyra preciseringarna inom miljömålet Bara naturlig försurning som rör sjöar och vattendrag:

Påverkan genom atmosfäriskt nedfall

Nedfallet av luftburna svavel- och kväveföreningar från svenska och internationella källor medför inte att den kritiska belastningen för försurning av mark och vatten överskrids i någon del av Sverige.

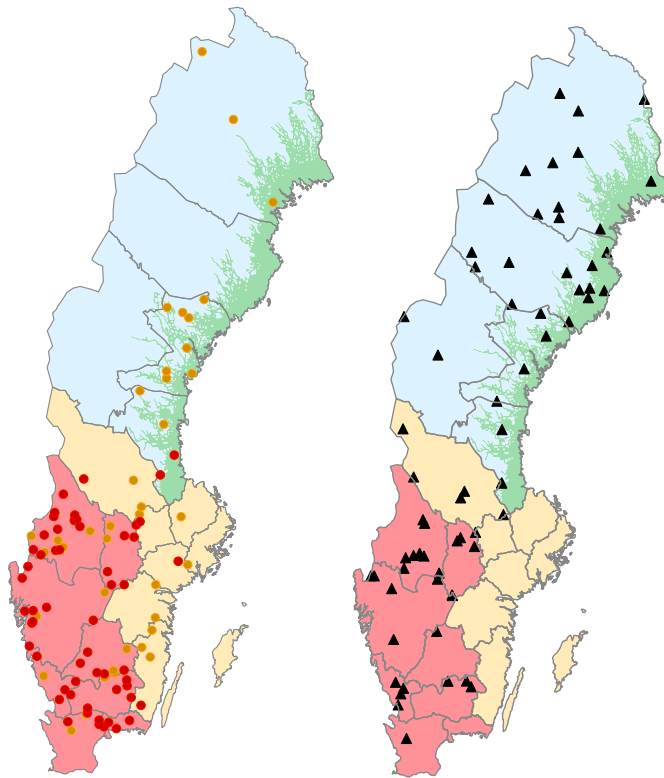
Försurade sjöar och vattendrag

Sjöar och vattendrag uppnår oberoende av kalkning minst god status med avseende på försurning enligt förordningen (2004:660) om förvaltningen av kvaliteten på vattenmiljön.

Betoningen i denna rapport ligger på analyser av data med uppmätta värden. Vattenkemiska trender i sjöar och vattendrag presenteras för att visa på de regionala mönstren av återhämtning med fokus på förutsättningar för återhämtning av försurningskänsliga levande organismer. Vidare beskriver vi biologisk återhämtning från försurning genom en sammanställning av nya svenska och internationella publikationer. I en särskild studie undersöker om dokumenterade mörtbestånd som försvunnit under perioden med hög försurning har återvänt. Mörtten är en försurningskänslig allmänt utbredd fiskart, och vi diskuterar om förändringar i mörtbestånd kan ses som en indikation på återhämtning från försurning. En ny bedömning av andelen försurade sjöar i Sverige, som baserar sig på ungefär 5 000 sjöar som ingår i den hela första omgången av Sjöomdrevet 2007–2012, presenteras (Fölster m.fl. 2014a). Överskridandet av kritisk belastning presenteras kortfattat. För en mer utförlig analys av skogsbrukets betydelse för beräkningarna hänvisas till rapporter av Löfgren m.fl. (2014) och Moldan m.fl. (2014). Slutligen diskuterar eventuella felkällor i beräkningsmodellerna samt relevansen av de uppsatta miljömålen.

Dataunderlag

Analysen av trender i sjökemi baserar sig på ett urval av nationella och regionala trendsjöar samt IKEU-referenser. Urvalet består av sjöar som provtagits för vattenkemi 3–4 gånger per år och sjöar med obrutna tidsserier sedan 1988. Därefter begränsades urvalet till sjöar med genomsnittligt ANC-värde $< 0,3$ mekv/l för att representera försurningskänsliga sjöar. Urvalet omfattar 95 sjöar som täcker hela Sverige, men med betydligt fler sjöar i södra Sverige (Figur 2). Sjöarna valdes ursprungligen ut till miljöövervakningsprogrammen för att representera okalkade referenser till kalkade sjöar och representerar därför försurningskänsliga sjöar i Sverige (Naturvårdsverket 1985). De är opåverkade av punktutsläpp och jordbruk. Sjöarnas avrinningsområden är tillräckligt stora för att enskilda skogsbruksåtgärder inte ska ha någon betydande påverkan på sjön. Vattenkvaliteten styrs därmed till största delen av klimat, deposition och skogsbrukets storskaliga och långsiktiga påverkan. Endast ytproverna användes om prover från flera djup fanns tillgängliga och för sjöar med fler än fyra prover per år valdes ett prov per årstid ut för att få ett homogent dataset.



Figur 2. Urval av 95 trendsjöar och 64 trendvattendrag som ingick i utvärderingen. Röda symboler anger de 57 sjöar och 19 vattendrag med minst ett uppmätt pH-värde under 5,6 som användes för att visa på möjligheten för biologisk återhämtning. Färgerna i bakgrundskartan visar uppdelningen i landsdelar utifrån försurningstryck baserat på länsgränser och för Norrland efter högsta kustlinjen.

Sammansättningen av vattendragsstationerna inom miljöövervakningen är betydligt mer heterogen än den för sjöarna. De längsta tidsserierna omfattar främst flodmynningar och större uppströms liggande stationer. Från mitten av 1980-talet finns ett mindre antal små skogsbäckar som valdes ut för att vara försurningskänsliga, och inom IKEU-programmet (Integrerad kalkeffektuppföljning) finns ett antal okalkade referenser med mätningar sedan 1990-talet. I slutet av 1990-talet startade också IM-programmet (Integrerad miljöövervakning) med provtagning av mycket små skogsvattendrag. Vid revideringen 1997 tillkom många mindre vattendrag och inom den regionala övervakningen har provtagningsfrekvensen i många små vattendrag successivt förtätats. För en utförlig beskrivning av de svenska miljöövervakningsprogrammen hänvisas till en artikel i tidskriften AMBIO (Fölster m.fl. 2014b). För denna rapport valde vi att begränsa trendanalysen i vattendrag till perioden 1998–2013 för att få så många jonsvaga vattendrag med homogena tidsserier som möjligt. Vidare uteslöts flodmynningarna eftersom de ofta har mycket stora och heterogena avrinningsområden. Med restriktionen att medel-ANC skulle vara $< 0,3$ blev det ett urval av 64 vattendrag ur programmet Trendvattendrag, IKEU, IM och regional miljöövervakning. För stationer med mer än 12 prover per år togs bara ett prov per månad med. En del av vattendragen i Norrlands inland saknar prover under vintersäsongen.

Beskrivningen av försurningstillståndet i Sveriges ytvatten och överskridandet av kritisk belastning baserar sig på Sjöomdrevet 2007-2012 (Grandin 2007, Fölster m.fl. 2014a). Sjöarna är utvalda genom ett stratifierat slumpat urval så att resultatet kan räknas om till att ge en beskrivning av tillståndet i alla Sveriges sjöar. Huvuddelen av sjöarna ingår i det nationella miljöövervakningsprogrammet och en mindre del är regionala tillägg som valts ut enligt samma statistiska principer som det regionala programmet.

Samtliga kemianalyser är utförda på Institutionen för vatten och miljö på SLU och hämtade från den nationella databasen inom ramen för SLU:s datavärdskap (www.slu.se/vatten-miljo).

Metoder för utvärderingen

Redovisningarna av trender och försurningstillstånd är gjorda i fyra regioner. Indelningen baserar sig på den indelning i tre regioner utifrån län och försurningstryck som använts i underlaget till den senaste fördjupade utvärderingen av försurningsmålet (Fölster m.fl. 2012). I denna rapport har norrlandsregionen delats upp i en kustregion och en inlandsregion utifrån högsta kustlinjen (ca 200 m ö h). Uppdelningen av norrlandsregionen motiveras dels av att kusten är mer påverkat av försurande deposition än inlandet men även av att det under högsta kustlinjen förekommer påverkan av fossilt svavel från mark som utgörs av gamla havssediment.

Beskrivningen av trenderna i vattenkemin gjordes på årsmedianer av samtliga mätvärden inom respektive region. Trendanalysen gjordes med det ickeparametriska Mann-Kendall-testet på dessa regionala årsmedianer.

Försurningsbedömningen av Sjöomdrevet är gjorda enligt Naturvårdsverkets handbok (Naturvårdsverket 2007). En sjö klassas som försurad med måttlig status eller

sämre om pH-förändringen sedan förindustriell tid (1860) är större än 0,4 pH-enheter. Klassningen gjordes med MAGIC_{bibliotek} version 9 (www.ivl.se/magicbibliotek).

Kalkpåverkade sjöar försurningsbedömdes efter korrigering för kalkningspåverkan med hjälp av kvoten mellan Ca och Mg i okalkade närliggande referenser och med hänsyn tagen till Mg-halten i kalkningsmedlet enligt metodiken i (Fölster m.fl. 2011b). Som kalkpåverkade klassades sjöar med kalkning inom avrinningsområdet tillräckligt för att höja pH mer än 0,1 enheter baserat på kända kalkdoser och uppmätt vattenkemi. Kalkningsuppgifter hämtades från länsstyrelsernas kalkningsdatabas (kalkdatabasen.lansstyrelsen.se).

Beräkningen av kritisk belastning av försurande nedfall är gjord med en modifierad version av FAB-modellen med indata från MAGIC_{bibliotek} och ANC_{limit} satt till det värde som motsvarar en pH minskning på 0,4 enheter jämfört med referenstillståndet. Metodiken finns beskriven i Moldan m.fl. (2014).

Trender i vattenkemi

Den minskande svaveldepositionen sedan 1980-talet har lett till motsvarande minskningar av sulfathalten i ytvatten i Nordeuropa och Nordamerika (Stoddard m.fl. 1999). Sulfatminskningarna har i många fall också lett till ökad alkalinitet och pH. I takt med att depositionen planat ut på en nivå med vad den var för 100 år sedan (Figur 1) har även sulfatminskningen i ytvattnet delvis klingat av. I underlaget till den senaste fördjupade utvärderingen visades på den stora skillnaden i respons på depositionsminskningarna mellan olika sjöar och vattendrag genom att jämföra trenderna mellan tioårsperioder för enskilda vattenförekomster (Fölster m.fl. 2011a, Fölster m.fl. 2012). I den här rapporten fokuserar vi på den genomsnittliga utvecklingen av vattenkemin för fyra olika försurningsregioner: Sydvästra Sverige (SV), Östra och mellersta Sverige (ÖM), Norrlands kustland under högsta kustlinjen (NK) och Norrlands inland (NI).

Sjöar

Den tydligaste trenden i sjöarnas vattenkemi är den minskande sulfathalten med signifikanta trender i alla fyra regioner (Figur 3a, Tabell 1). Halterna har minskat med hälften, eller ännu mer. Det är visserligen mycket, men kan jämföras med depositionsminskningen på 80–90 % (Figur 1). Minskningen av sulfat i sjövattnet fördröjs av den hydrologiska omsättningen i avrinningsområdet och genom olika retentionsprocesser i marken. Medan depositionen planade ut kring 2000, fortsätter sulfathalten att minska med bara något svagare trend 2000–2013 jämfört med 1990-talet. Enstaka sjöar uppvisar dock en snabbare respons på depositionsminskningen med en utplanad sulfathalt det senaste decenniet (Fölster m.fl. 2011a).

Halten av icke marina baskatjoner (BC*) styrs av vittringen och jonbytet med marken. Dessutom finns en del baskatjoner bundna till organiskt material. När sulfathalten minskar, minskar ofta även baskatjonerna som en effekt av minskat jonbyte med marken. I de två sydliga regionerna där svaveldepositionen är högst minskade halten baskatjoner signifikant (Figur 3b). I de två nordliga regionerna kunde ingen signifikant trend påvisas. Resultaten stämmer med en mer djupgående statistisk analys av halterna baskatjoner i vattendrag som visar att de minskande trenderna i södra Sverige är kopplade till den minskade depositionen, medan det i norra Sverige är naturlig klimatvariation som styr mellanårsvariationen, trots en minskande trend av sulfat (Lucas m.fl. 2013).

Kloridhalterna har legat relativt stabilt sedan år 2000 (Figur 3c). Innan dess påverkades halterna i sjöarna i södra och mellersta Sverige bland annat av ett stort inbrott av havssalt i samband med storm 1989 (Franzén 1990). I Norra Sverige var kloridhalten relativt stabil under hela mätperioden.

Halterna av organiskt kol (TOC) ökar signifikant i södra Sverige och längs norrlandskusten. ”Förbruningen” är ett fenomen som noterats i norra Europa och Nordamerika och är delvis en effekt av den minskande försurningen (Monteith m.fl. 2007). Det bekräftas av att förbruningen är tydligast i de två sydliga landsdelarna där depositionspåverkan varit störst. En studie av 35-åriga tidsserier i svenska vattendrag visade att förutom den ökande trenden som beror på minskad deposition styrs TOC även av naturliga klimatprocesser som ger synkrona svängningar i hal-

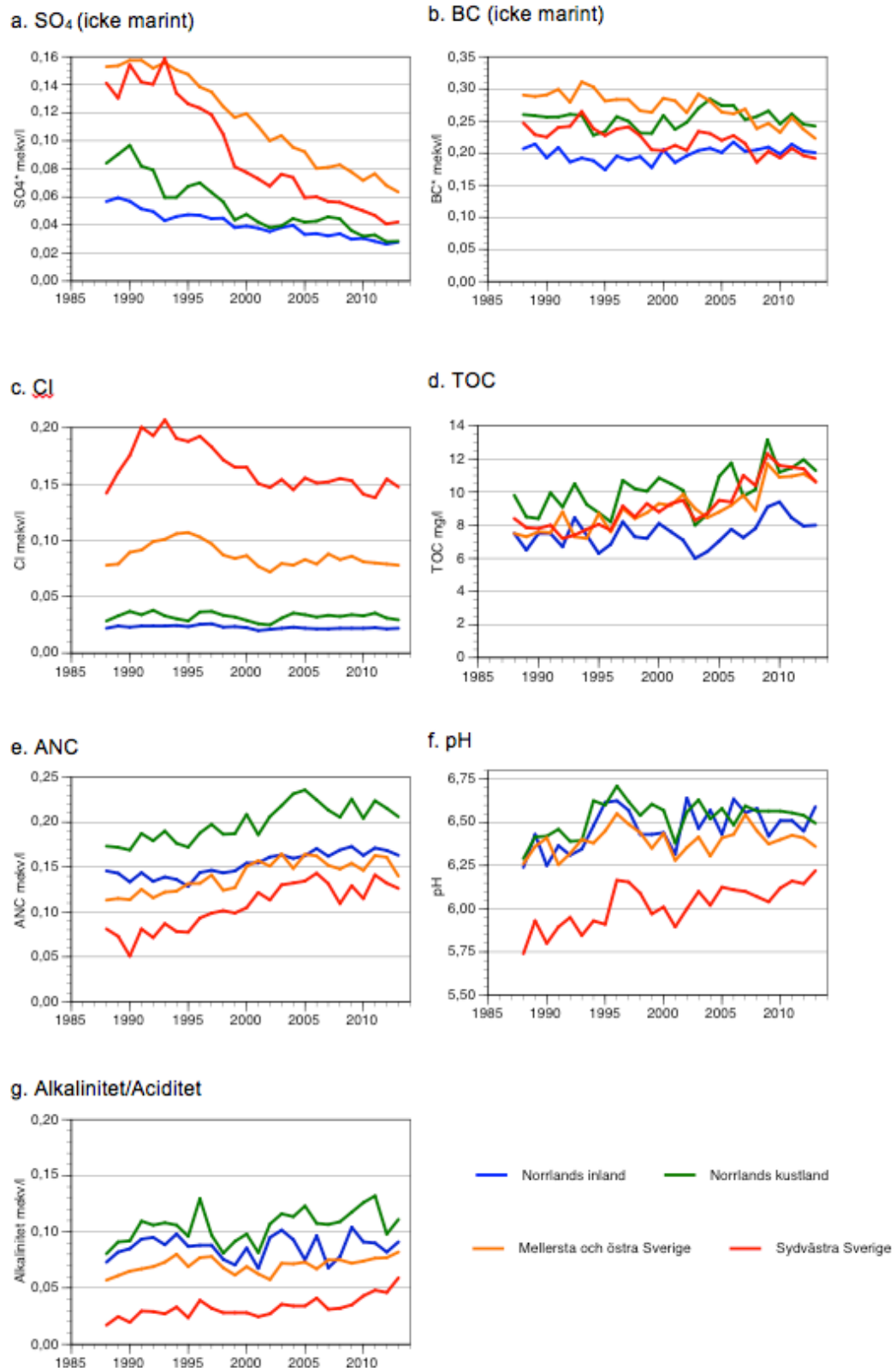
terna i hela Sverige (Erlandsson m.fl. 2008b). I sjöarnas tidsserier kan det förklara antydan till en puckel de senaste 10 åren i alla fyra landsdelar (Figur 3d).

En ny paleolimnologisk metod har utvecklats där man kan rekonstruera historiska halter av TOC genom att analysera sedimentproppar med spektroskopi (NIRS). När metoden tillämpades på sjöar i södra Sverige visade det sig att den senaste tidens ökning av TOC föregicks av en motsvarande minskning under början av förra seklet som motsvarar depositionsutvecklingen (Cunningham m.fl. 2011, Valinia m.fl. 2012). Det antyder att förbruningen är en återgång till ett förindustriellt brunare tillstånd än det vi är vana vid.

ANC (syraneutraliserande förmåga) är ett mått på vattnets buffertförmåga och beräknas som skillnaden mellan baskatjoner och anjonerna sulfat, klorid och nitrat. ANC ökar i alla landsdelar som en effekt av den minskande sulfathalten (Tabell 1). I de två sydliga landsdelarna dämpas ANC-ökningen något av minskningarna i baskatjoner. För de uppmätta surhetsparametrarna pH och alkalinitet dämpas återhämtningen ytterligare av förbruningen som ger en ökning av organiska syror. Det är bara i den sydvästliga landsdelen som det är en tydlig positiv trend med en ökning av pH med cirka 0,4 enheter och för alkaliniteten med cirka 0,03 mekv/l (Figur 3f och g). I Norrlands kustland samt östra och mellersta Sverige ger visserligen det statistiska testet en signifikant ökning av alkalinitet, men figuren över tidsserien tyder på att det snarare är delar av en naturlig klimatstyrd svängning. Det tydliga inslaget av både upp- och nedgångar gör dessutom att det statistiska testet inte är giltigt.

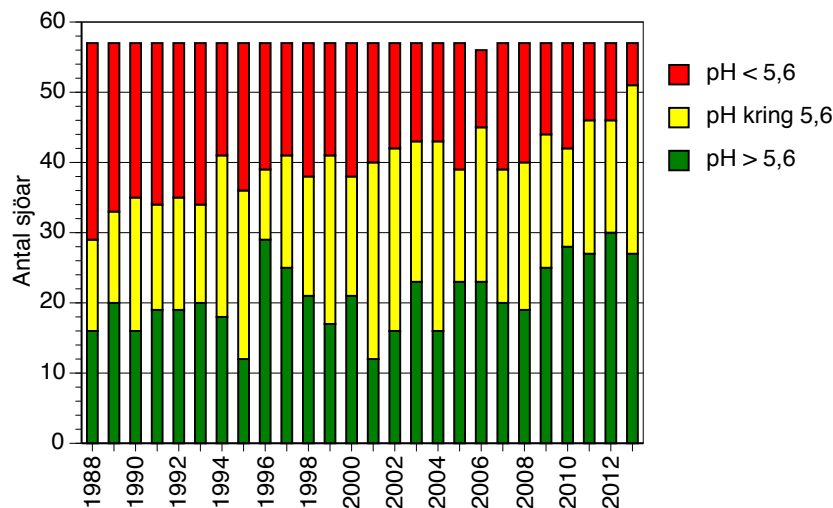
Tabell 1. Statistiskt minskande ("–") och ökande ("+") trender i årsmedianer av vattenkemi i 95 sjöar med ANC < 0,3 mekv/l 1988–2013 fördelade på fyra regioner, Sydvästra Sverige (SV), Östra och mellersta Sverige (ÖM), Norrlands kustland under högsta kustlinjen (NK) och Norrlands inland (NI). (Mann-Kendall tvåsidigt test, $p < 0,05$). "n" avser icke signifikant förändring. Värden inom parentes anger att trenderna inte är monotona.

Parameter	NI	NK	M	SV
Antal sjöar	8	7	17	63
SO ₄	–	–	–	–
BC*	n	n	–	–
ANC	+	+	+	+
TOC	n	+	+	+
pH	+	n	n	+
Alk./Acid mekv/l	n	(+)	(+)	+



Figur 3. Årsvisa medianer av vattenkemi 1988–2013 i 95 trendsjöar med medel ANC < 0,3 mekv/l.

Ett pH-värde på 5,6 har angetts som tröskelvärde för många surhetskänsliga organismer. Det pH-värdet är också inflexionspunkten för titreringskurvan av pH mot ANC, det vill säga det pH-värde då buffringsförmågan är lägst och en förändring av förurningspåverkan har störst påverkan på pH. För att se om den kemiska återhämtningen förväntas ha någon biologisk effekt i trendsjöarna klassades sjöarna årsvis utifrån om pH-värdet i samtliga 4 prov som togs varje år låg över eller under 5,6 eller om pH varierade kring detta värde. De allra flesta sjöarna med låga pH-värden ligger i sydvästra Sverige (Figur 2). Den tydligaste trenden är att andelen kroniskt försurade sjöar har minskat, det vill säga de sjöar som alltid har ett pH-värde under 5,6 (Figur 4). Även andelen sjöar med alla pH-värden över 5,6 har ökat, men inte lika tydligt. Båda trenderna är statistiskt signifikanta med Mann-Kendall test. Resultaten tyder på att den kemiska återhämtningen har gett möjlighet även för en biologisk återhämtning i trendsjöarna.



Figur 4. Årsvis klassning av pH för 57 trendsjöar med något uppmätt pH-värde < 5,6 uppmätt 1988–2013. Sjöarna är klassade utifrån om alla fyra prover tagna under året hade pH under (rött) 5,6, över (grönt) 5,6 eller om prover både över och under 5,6 (gult) förekom.

Vattendrag

Även för vattendragen är den tydligaste förändringen minskningen i sulfathalt som är statistiskt signifikant i alla regioner (Figur 5). En jämförelse med sjöarna (obs olika skala på y-axeln i vissa fall) visar på skillnader i urvalen av sjöar och vattendrag. I vattendragen är medianhalten högre i Norrlands kustland jämfört med östra och mellersta Sverige. Detta tillsammans med den flacka kurvan för Norrlands kustland tyder på att för medianen av urvalet av vattendrag för Norrlands kustland påverkas sulfathalten av naturligt sedimentärt svavel. I regionen östra och mellersta Sverige är medianhalten i samma nivå som i Norrlands inland. Det beror på att samtliga vattendrag som valdes ut i östra och mellersta Sverige ligger i Dalarna där depositionen är lägst för regionen (Figur 2).

För baskatjonerna är den tydligaste förändringen i tidsserien puckeln kring 2003 som även ses för sjöarna. Bara sydvästra Sverige har en statistiskt signifikant

minskning som kan hänga samman med den minskade depositionen. I övriga regioner styr främst de naturliga klimatstyrda processerna baskatjonhalternas variation.

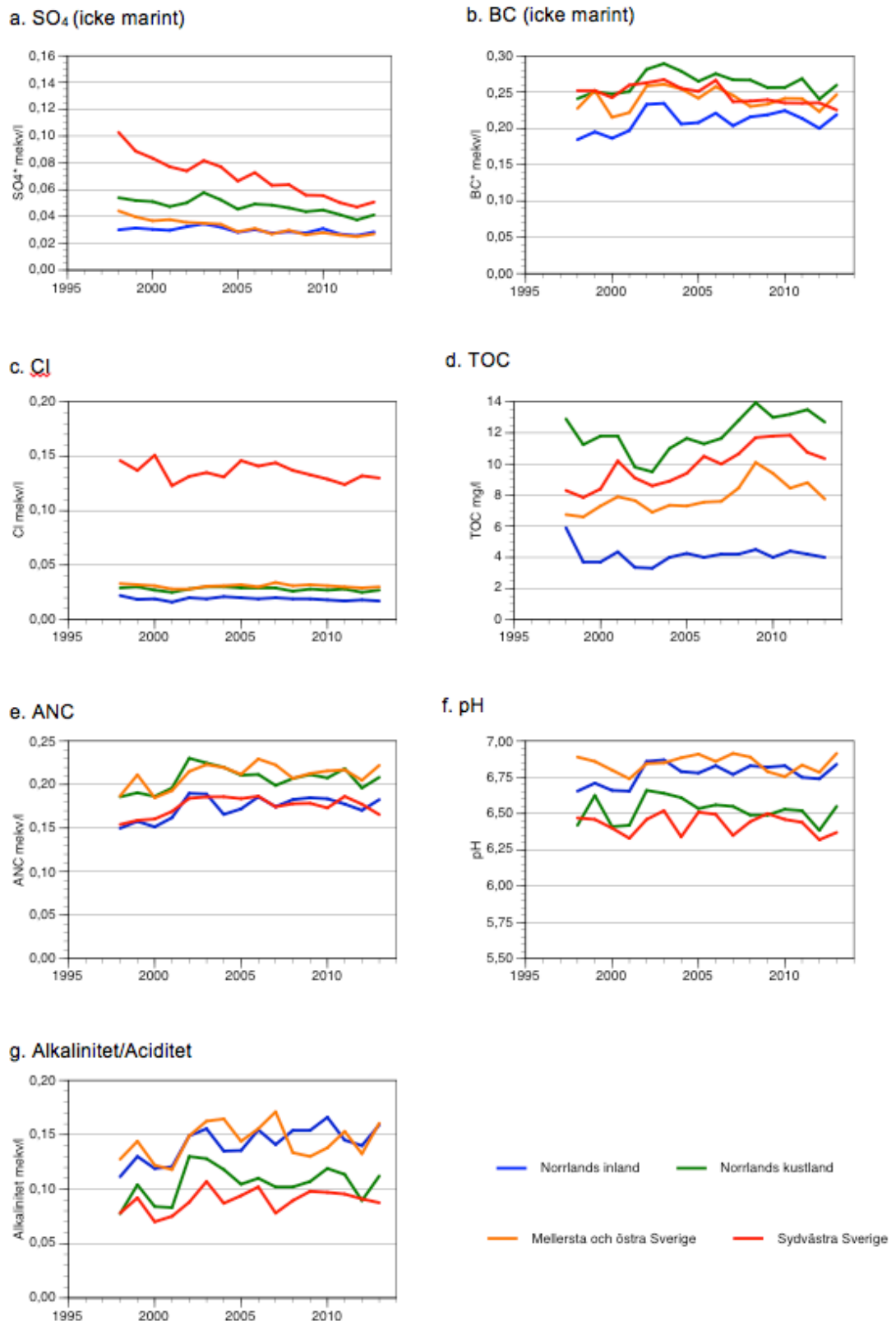
Halterna naturligt organiskt material, TOC, ökar tydligt och statistiskt signifikant i de två sydliga regionerna. I de två nordliga regionerna framträder ett minima kring 2003. Samma tillfälliga nedgång syns även i sjökemin, men blir tydligare i den kortare tidsserien för vattendragen. Det statistiska testet ger visserligen en signifikant förändring för TOC-halten i Norrlands kustland, men den tydliga icke-monotona förändringen (både upp- och nedgång) gör att testet inte är giltigt.

För surhetsmåttan ANC, alkalinitet och pH syns ingen förändring mellan 1998 och 2013, men undantag för en signifikant ökning av alkaliniteten för Norrlands inland. Det är värt att notera att vattendragen har högre regionsvisa medianer av surhetsparametrarna jämfört med sjöarna, och att man därför förväntar sig en mindre betydelse av depositionsminskningen för surheten jämfört med påverkan från naturliga processer.

Resultaten från trendanalysen visar att urvalet av sjöar är betydligt bättre för att beskriva den regionala förurningspåverkan jämfört med vattendragen. En större andel av sjöarna valdes ursprungligen ut med syftet att övervaka förurningspåverkan medan vattendragen har ett bredare syfte och är därmed mer heterogena. Ett snävare urval av vattendragen ger för få objekt för att visa på regionala trender. Ett urval av vattendrag som någon gång haft ett pH-värde under 5,6 1998–2013 gav till exempel 19 vattendrag. Studerar man dessa som enskilda objekt ser man att i tre vattendrag, Tangån, Lill-Fäntan och Trollbäcken, har antalet pH-värden över 5,6 ökat med tiden vilket borde ge förutsättningar för en biologisk återhämtning. Bakom den regionala genomsnittliga bilden kan alltså dölja sig en stor inbördes variation i respons på den minskande depositionen vilket visats i tidigare utvärderingar (Fölster m.fl. 2011a, Fölster m.fl. 2012).

Tabell 2. Statistiskt minskande ("–") och ökande ("+") trender i årsmedianer av vattenkemi i 64 vattendrag med ANC < 300 mekv/l fördelade på fyra regioner, Sydvästra Sverige (SV), Östra och mellersta Sverige (ÖM), Norrlands kustland under högsta kustlinjen (NK) och Norrlands inland (NI). (Mann-Kendall tvåsidigt test, $p < 0,05$). Tecken inom parentes anger att testet inte är giltigt eftersom tidsserien uppvisar både upp- och nedgångar. "n" avser icke signifikant förändring.

Parameter	NI	NK	ÖM	SV
SO ₄	–	–	–	–
BC*	n	n	n	–
ANC	n	n	n	n
TOC	n	(+)	+	+
pH	n	n	n	n
Alk./Acid	+	n	n	n



Figur 5. Regionsvisa årsmedianer av vattenkemi 1998–2013 i 64 vattendrag med medel ANC < 0,3 mekv/l.

- *Tabell 3.* Förekomst av pH-värden \geq / \leq 5,6 för vattendrag med något värde lägre än 5,6 under mätperioden.

Station	X koordinat	Y koordinat	Startår	Alla värden < 5,6	Något år med alla värden > 5,6	Signifikant ökning antalet värden över
Svartberget	713297	169256	1986			
Höjdabäcken	710354	155465	1984		ja	
Gammtratten IM	708507	161362	1998			
Lillån, E4:an	706025	169395	1998			
Bastuån	699972	140367	1998		ja	
Härån (Storån)	684705	153450	1997		ja	
Tangån, Tangådalstugan	682240	134235	2005		ja	ja
Lill-Fämtan	675032	135400	1986			ja
Sörjabäcken (Lillån)	673815	153365	1997		ja	
Vingån, Vingäng	673341	134207	2002			
Laxbäcken	663718	148037	1989			
Ringsmobäcken	654845	126685	1984			
Lommabäcken Nedre	650920	143244	1981	ja		
Bråtängsbäcken	650799	143323	1981	ja		
Musån, Åsvedjan	637183	135330	2005			
Aneboda IM	633280	142425	1996	ja		
Pipbäcken Nedre	633070	131710	1984			
Lillån-Bosgårdsån	631840	133310	1997			
Trollbäcken, mynningen	624715	133405	1990		ja	ja

Biologisk återhämtning

En kemisk återhämtning är en förutsättning för att förurningskänsliga organismer som slagits ut av förurningen ska kunna komma tillbaka, men återkolonisationen kan ibland ta längre tid. Frågan om biologisk återhämtning förekommit i samband med kemisk återhämtning har studerats i några rapporter och vetenskapliga artiklar under de senaste åren. I en rapport från ICP Waters rapport studerades förändringar över tid (1982 till 2011) hos den biologiska mångfalden av bottenfauna i 55 vattendrag och 34 sjöar i Sverige, Norge, Tyskland, Lettland, Storbritannien och Tjeckien (Velle m.fl. 2013). De data som ingår i studien kommer från nationella övervakningsprogram och de flesta av de inkluderade vattnen är näringsfattiga och har påverkats av långtransporterade luftföroreningar som lett till förurning. Den kemiska statusen i de undersökta sjöarna och vattendragen har förbättrats (kemisk återhämtning), med minskade koncentrationer av sulfat och ökat pH och buffertkapacitet (ANC) på grund av en nedgång i långtransporterade luftföroreningar.

Velle och medförfattare finner i sin studie att artdiversitet, mätt som Shannons diversitetsindex, ökar i de flesta sjöar och vattendrag i studien. Denna ökning är signifikant i tre länder: Sverige, Tyskland och Lettland. Ökningen är större i vattendrag jämfört med sjöar och i Sverige är det enbart i littoralzonen i sjöar man ser en ökning (förutom i vattendrag), medan det är en signifikant minskning av diversiteten i sublittoralen i svenska sjöar. Författarna diskuterar om ökningen av DOC och brunhet kan ha påverkat bottenfaunan i sublittoralen med minskad diversitet som följd. Man har också undersökt förändringar i artsammansättning över tid och finner att det enbart är i svenska sjöar som det finns en konsekvent förändring i sammansättningen av bottenfauna i alla sjöar över tid. I några av de studerade regionerna, såsom Norge finner man ingen signifikant ökning av diversitet, trots en klar ökning i antalet förurningskänsliga arter och förändring i bottenfaunans samhällsstruktur som sammanfaller med förändringar i vattenkemin. Man har alltså fått en förändring i artsammansättningen mot mer förurningskänsliga arter utan att diversiteten ökat. Detta kan bero på att känsliga arter som återkoloniserar ett vatten samtidigt slår ut okänsliga arter som tidigare fanns i samma vatten. Det kan också bero på att förlusten av toppredatorer såsom fisk under förurningsfasen samt återkomsten av fiskarter förändrat artsammansättningen av bottenfauna.

Författarna diskuterar också skillnaden i återhämtning mellan sjöar och vattendrag och ger förslag på vad denna skillnad kan bero på. Organismer i vattendrag kan vara bättre anpassade till snabb återkolonisering eftersom variationen i surhet där är större än i sjöar även under opåverkade förhållanden. Det kan också bero på att biotan i sjöarna varit mindre påverkade av förurning än i vattendragen. Författarna drar utifrån de mönster de funnit slutsatsen att bottenfauna i vattendrag är känsligare för förurning jämfört med bottenfauna i sjöar, men utan att förklara mekanismerna som skulle ligga bakom denna skillnad. En ytterligare faktor att ta hänsyn till är att bottenfaunan i vattendrag i högre grad än i sjöar är identifierad till artnivå i de nationella övervakningsprogrammen, vilket kan ha påverkat slutsatserna i studien. Detta visar på vikten av att noga testa för och ta hänsyn till förändringar i taxonomisk upplösning över tid och personalförändringar bland anlitade taxonomer i långtidsstudier som denna. Man bör också interkalibrera artbestämningar mellan

personer och olika laboratorier samt inkludera interna procedurer för att standardisera artbestämningar.

Velle och medförfattare (2013) fann en korrelation mellan ökad biodiversitet och minskad sulfatkoncentration. På samhällsnivå finner man att både tidpunkten för återhämtning och förändringen i taxonomisk sammansättning är icke-linjär och att återhämtningen inte går att jämföra mellan olika provtagningslokaler. Författarna drar slutsatsen att framtida biologisk återhämtning från försurning inte kommer att visa ett samstämmigt mönster, men att vi kan förvänta oss en fortsatt ökning av den biologiska mångfalden i många försurningspåverkade vatten. Samtidigt påpekar man att ytterligare studier behövs för att kunna separera förändringar i försurningspåverkan från annan påverkan som också ändrats under samma tidsperiod såsom ökad vattentemperatur, ökade DOC-koncentrationer eller eutrofiering. Positivt är ändå att medan den artrikedomen i sötvatten minskar globalt sett, så ökar den i Sverige.

Ett problem när man ska studera återhämtningen från försurning är att det saknas bra populationsdata för bottenfauna för den förindustriella perioden och för perioden med störst försurningspåverkan (1970- och 80-talen). Författarna anser att det är troligt att den största återhämtningen från försurning skedde innan miljöövervakningen av dessa lokaler påbörjades, vilket kan förklara att det inte finns några signifikanta trender i en del vatten som varit kraftigt påverkade av försurning (t.ex. i Tjeckiska vattendrag). Man ser dynamiska förändringar i bottenfauna-populationer och anser det otroligt att den biologiska mångfalden ännu har återhämtat sig till förindustriella nivåer, men samtidigt vet vi inte om denna återhämtning kommer att leda till att systemen återvänder till en diversitet och ekologisk status som liknar den förindustriella. Med ökad biologisk mångfald anser författarna att ekosystemen kan förväntas vara mer motståndskraftiga mot andra framtida förändringar såsom klimatpåverkan eller försämringar av habitat-kvalitet. Biotan i vattendrag verkar vara känsligare för förändringar än biotan i sjöar vilket att man bör ta hänsyn till vid förvaltning av vattendragens ekosystem.

I en svensk studie som fokuserar på återhämtning från försurning i svenska sjöar undersöktes om artgrupper av bottenfauna inom ett organismsamhälle struktureras på olika rumsliga skalor. För att se om olika miljövariabler påverkar de olika artgruppernas sammansättning och eventuell förändring över tid (Johnson m.fl. 2010, Angeler m.fl. 2012). Det är viktigt att förstå vilka (miljö) faktorer som påverkar den biologiska mångfalden eftersom detta påverkar hur vi skall förvalta våra ekosystem på bästa sätt och hur motståndskraftiga ekosystemen är mot förändringar. Angeler och Johnson testade detta i ett svenskt dataset för perioden 1988–2007 som innehöll bottenfaunadata från littoralzonen för 11 (antropogent) försurade och 15 neutrala sjöar.

Fördelen med den statistiska metod författarna använder (multivariat tidsseriemodellering – RDA-PCNM) är att man kan testa om försurningskänsliga arter endast hittas i artgrupper som reagerar på minskad försurning. Författarna såg ingen tydlig trend i kemisk återhämtning i sjöarna och återhämtningen i försurade sjöar var svag (ökning med 0.1 till 0.2 pH enheter och pH låg under 6 i de flesta fall). När man analyserade förändringar över tid i bottenfaunans artsammansättning fann man två tydliga artgrupper som förändrades. Den första artgruppen visade på en tydlig lång-

siktig (monoton) förändring i artsammansättning över tid i båda sjötyperna, medan den andra artgruppen visade på korta fluktuationer (utan riktning) i förändrad artsammansättning.

Förändringar i artsammansättning i artgruppen som långsiktigt förändrades korrelerade negativt med förändringar i sulfatkoncentrationen medan en positiv korrelation med pH enbart kunde påvisas för en del av de försurade sjöarna. Det samma gällde miljövariablerna siktdjup (negativt) och TOC (positivt) som också korrelerade med förändringar i sammansättning för denna artgrupp. För artgruppen med korta fluktuationer fanns inte samma tydliga samband mellan miljövariabler och förändringar i artsammansättning över tid. I nästa steg identifierade författarna vilka taxa som bidrog till förändringar i artsammansättning över tid och fann att dessa taxa varierade både inom och mellan försurade och neutrala sjöar. I den första gruppen (långsiktiga förändringar) fann man mellan 3 och 40 taxa och i den andra (korta fluktuationer) mellan 2 och 17 taxa och många av dessa taxa fann man både i försurade och neutrala sjöar. Man fann också komplexa samband mellan taxa som tidigare identifierats som försurningskänsliga i olika typer av index, där en del av dessa korrelerade väl med förändringen av artsammansättning och minskad försurningspåverkan medan andra försurningskänsliga taxa inte visade på ett sådant mönster.

Författarnas slutsats är att det finns en synkroniserad dynamik i hur artsammansättning av bottenfauna förändras över tid som styrs av storskaliga förändringar i miljön, men deras studie kan inte tydligt påvisa vilka dessa variabler är. Studien visar också att förändringar i artsammansättning svarar på komplexa processer som inkluderar variabler på både lokala och regionala skalor. Detta är positivt då det innebär att dynamiska lokala processer kan bidra till att upprätthålla den biologiska mångfalden av försurningskänsliga arter på den regionala skalan. Slutligen drar författarna slutsatsen att den återhämtning som skett från försurning hittills inte varit tillräcklig stor för att man skall kunna observera en stor och universell biologisk återhämtning. Därför behövs det ytterligare förvaltningsåtgärder och mer tid för att dessa sjöar fullt ut skall hinna svara på minskningar i försurande utsläpp.

I en tidigare studie från samma författare undersöktes förändringen i både växtplankton och bottenfaunasamhällen 1988–2008 i fyra sjöar som återhämtar sig från försurning och fyra neutrala sjöar i förhållande till variation i klimat (Johnson m.fl. 2010). Artsammansättningen i de försurade sjöarna blev mer lik artsammansättningen i de neutrala sjöarna över tid, medan man inte kunde se samma mönster för dominansförhållanden (vilka som var de vanligaste arterna). Förändringen i artsammansättning var större i sjöar som återhämtade sig från försurning jämfört med de neutrala sjöarna, med den största förändringen i växtplanktonsamhället. Författarna såg ingen tydlig återhämtning i vattenkemin, men förändringar i växtplankton- och bottenfaunasamhället samvarierade med förändringar i mellanårsvariationen i klimat (NAO-index och vattentemperatur) förutom med minskad försurning. Författarna drar slutsatsen att eftersom återhämtningen i artsammansättning skiljer sig mellan de enskilda sjöarna samtidigt som de variabler som förklarar dessa förändringar också skiljer sig åt, är den biologiska återhämtningen ett komplext fenomen och hur förändringar i klimat interagerar i denna process är dåligt känt.

Den sista studien exempel är en studie som omfattar trender i både vattenkemi och de biologiska parametrarna växtplankton, zooplankton, bottenfauna från olika ni-

våer och fisk i tre försurade trendsjöar (Holmgren 2014). Ingen av sjöarna har återhämtat sig kemiskt till förindustriell status men SO_4 och Ca har sjunkit i alla tre sjöarna under de 20 år det finns data för. Totalmängden kol (TOC) och pH ökade i en sjö under perioden, medan enbart TOC ökade i en annan sjö och enbart pH ökade i den tredje sjön. Mört och abborre var de dominanta fiskarterna i de tre sjöarna och den försurningskänsliga mörtten har försvunnit från en av sjöarna under försurningsfasen. Arton biologiska indikatorer (för organismgrupperna fisk, bottenfauna, djurplankton och växtplankton) visade på en signifikant förändring över tid i åtminstone någon av de tre sjöarna. Antalet arter av djurplankton och bottenfauna ökade i två av sjöarna, medan det inte var någon förändring i diversitet för fisk eller växtplankton i någon av sjöarna. Det fanns inga tydliga förändringar för indikatorer baserade på antalet individer eller biomassa för någon av de fyra organismgrupperna i studien. Holmgren fann få relationer mellan biologiska data och miljövariabler i studien, en sådan var dock ett positivt förhållande mellan andelen abborrar i fiskpopulationen och pH i en av de tre sjöarna. Trots att pH ökade i två av de tre sjöarna fanns inga tydliga tecken på biologisk återhämtning och Holmgren förklarar avsaknaden av återhämtning med försurningsvariablerna såsom pH ännu inte kommit tillbaka till förindustriella nivåer.

Sammanfattningsvis finns tydliga indikationer på biologisk återhämtning i svenska sjöar och vattendrag, men återhämtningsförloppet är komplext och det är osäkert om biologin kommer kunna återkomma till ett förindustriellt tillstånd.

Mörtens återkomst

Det saknas nästan helt biologiska mätdata från tiden före försurningen som kan visa hur återhämtningen skett i förhållande till det förindustriella tillståndet. Däremot finns det en omfattande datamängd som beskriver fiskförekomst baserat på enkätundersökningar sedan förra sekelskiftet och framåt. Genom att jämföra dessa data från olika tidsperioder inklusive senare tiders provfisken, kan man beskriva hur fiskfaunan påverkats av försurningen och återhämtningen. Mört är en vanlig indikatorart för försurningspåverkan som lämpar sig för en sådan studie. I en forskningsstudie jämfördes utvecklingen av mörtbestånden med den vattenkemiska utvecklingen modellerad med MAGIC. De två metoderna gav samstämmiga resultat med avseende på försurning i 78 av 85 sjöar (Valinia m.fl. 2014). I de sjöar som gav motstridiga resultat kunde detta förklaras genom en noggrannare analys. Studien visar att databasen med historisk fiskförekomst kan användas för att följa försurningens utveckling.

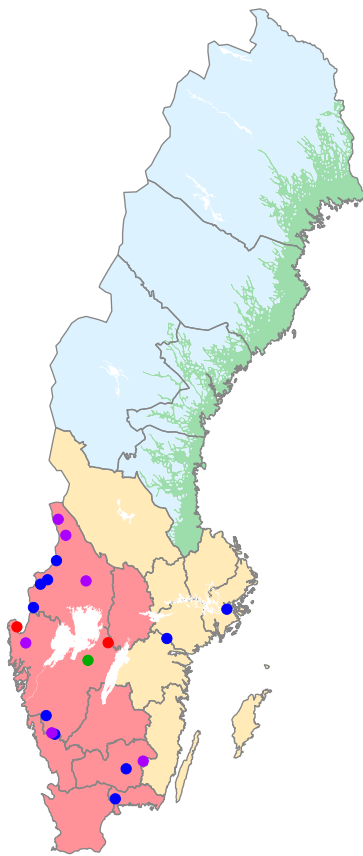
Den historiska och nutida mörtanalysen bygger på databasen ([PIKE](#)) som byggts upp vid institutionen för ekologi, miljö och geovetenskap vid Umeå universitet. Databasen innehåller information om fiskförekomster i sjöar. Förutom artsammansättning innehåller PIKE information om introduktioner, förlust av arter, rotenonbehandlingar och allmän information om sjöar. Huvuddelen av dessa data har samlats in av myndigheter och privatpersoner som har delat med sig av sina kunskaper och sina datasammanställningar. Framförallt är information inhämtad från provfisken samt intervju- och enkätundersökningar. De huvudsakliga källorna till historisk fiskförekomst är inventeringar gjorda av Lundberg (1899) och Cederström (1895)

samt de sjöinventeringar som genomfördes under 1930-talet och som digitaliserats av personal på Sötvattenslaboratoriet, Drottningholm (nuvarande Institutionen för akvatiska resurser på SLU). Data kring nutida fiskförekomst är främst hämtade från den nationella nätfiskedatabasen (NORS) och Nordiska rådets enkätundersökning (Rask m.fl. 2000).

För denna rapport valde vi ut sjöar som hade data med fiskförekomst från tre tidsperioder; För försurningen (1960), under försurningen (1960-1990) och under återhämningsperioden (efter 1990). Från dessa valdes sjöar ut som hade registrerad förekomst av mört före försurningen och saknade mört under försurningen. Sjöar i Norrland valdes bort på grund av att de flesta fiskundersökningarna under 1970-1980 var relaterade till fiskutsättningar och därför bara omfattar förekomst av ädel-fisk. Tidigare studier har också visat att förekomsten av mört i Norrland främst styrs av invandringshistorik, interaktion med abborre och gädda samt rotenonbehandling (Spens m.fl. 2008). För att minska osäkerheterna så togs endast sjöar som registrerat mer än 3 arter vid varje provfiske, detta var ett aktivt val eftersom osäkerhetsanalyser visade att sjöar med mindre än tre arter registrerade oftast var inplanteringar eller provfisken efter en specifik art. Klassificeringssystem byggde på Valinia et al (2014) men med strängare urval för att klassificera en sjö som försurad. En sjö klassificerades som försurad när mört var närvarande i $\geq 75\%$ av provfisken innan 1960, $\leq 25\%$ mellan 1960-1990 och att det ska finnas mört i undersökningar efter 1990. Ett första urval gav 33 sjöar där mörten hade försvunnit under försurningsperioden, men en noggrannare analys av fiskdatabasen visade att en del av sjöarna hade manipulerats med t.ex. rotenon behandlingar på 60-talet eller att arter hade planterats in (fler än tre) så att de följde med i analysen. Ett annat exempel är den sjön Trummen som genomgick utfiskning av bl.a. mört under 1970-talet som restaureringsåtgärd mot övergödning, vilket förklarar att mörten försvann under försurningsperioden för att sedan komma tillbaka utan att det hade med försurning att göra. Efter denna genomgång återstod 19 sjöar som bedömdes ha förlorat mörtbeståndet på grund av försurning. Av dessa hade 16 kalkats. Nutida fiskförekomst visade på att mörten återvänt i 11 av de 21 sjöarna (Tabell 4). Återhämtningen var större för kalkade än okalkade sjöar.

Tabell 4. Återkomst av mört i okalkade och kalkade försurade sjöar i södra Sverige

Mörttillstånd	Antal sjöar	Kalkad	Okalkad
Återhämtade	11	10	1
Försurade	8	6	2



Figur 6. Sjöar med mörtdata från perioderna före, under och efter förurningstoppen 1960 – 1990. Färgklassningen visar om mörten kommit tillbaka och om sjöarna kalkats.

Resultaten bekräftar resultaten från de vattenkemiska data och visar att återhämtningen från förurningen lett till att förurningskänsliga organismer som mörk kunnat återetablera sig efter att förurningspåverkan minskat drastiskt. Erfarenheterna från analysen visar att data från fiskundersökningar måste kompletteras med andra uppgifter och data för att man ska kunna dra säkra slutsatser om mörten beståndsutveckling är ett resultat av den minskande förurningen.

Försurningstillståndet i Sveriges vatten

Sjöar

Av de 5 084 sjöarna i Sjöomdrevet kunde alla utom 16 bedömas med MAGIC_{bibliotek}. 2 991 sjöar passerade Filter 1 i MAGIC_{bibliotek} vilket innebär att den matchade sjön var mycket lik den bedömda sjön med avseende på de parametrar som används för matchningen (Tabell 5). En femtedel, 1105 sjöar passerade genom Filter 2. Ytterligare 907 sjöar fick ingen matchning, men klassades som opåverkade eftersom pH antingen var över 7,3 eller för att Ca-halten var över 8 mg/l. De 16 sjöarna som inte fick någon klassning med verktyget MAGIC_{bibliotek} var med något undantag relativt välbuffrade och kunde därför antas vara opåverkade av försurning även om de inte klassades med det hårda kriteriet för pH och Ca-halt som är inbyggt i verktyget. Sjöarna som inte bedömdes av MAGIC_{bibliotek} klassades därför som opåverkade i de fortsatta uppskattningarna av andel försurade sjöar.

Tabell 5. Matchningssäkerhet i MAGIC_{bibliotek} för sjöar i Sjöomdrevet 2007-2012.

Filter	Antal sjöar
Filter1	2992
Filter2	1105
Filter3	64
Opåverkat välbuffrat	907
Ingen bedömning	16
Summa	5084

Preciseringarna av miljömålet som avser försurning i sjöar gäller för alla Sveriges cirka 96 000 sjöar > 1 ha. Genom en destratifiering av resultaten från Sjöomdrevet kunde andelen försurade sjöar i Sverige och olika landsdelar uppskattas. I hela Sverige var 10 % av sjöarna > 1 ha försurade 2010 (Tabell 6). Den största försurningspåverkan var i den sydvästra delen där så mycket som 47 % av sjöarna var försurade (Figur 7). I östra och mellersta Sverige, samt i Norrlands kustland var 9 % av sjöarna försurade och i Norrlands inland 2 %. MAGIC_{bibliotek} gör det möjligt att beskriva hur försurningspåverkan förändras både framåt och bakåt i tiden baserat på depositionsscenarioer från EMEP. När försurningen var som störst 1990 var så mycket som 17 % försurade i hela landet. Fram till 2030 förväntas endast en svag ytterligare återhämtning.

Den relativt stora andelen försurade sjöar i Norrland, särskilt under försurningsmaximum 1990, väcker en del frågor eftersom det motsäger tidigare forskningsresultat som visat att sjöförsurningen där är obetydlig och att försurningsproblemen istället drabbade vattendrag under vårfloden (Korsman 1999, Laudon m.fl. 2001). Möjliga förklaringar till att så många sjöar i Norrland klassats som försurade diskuteras under avsnittet om felkällor längre fram i rapporten. För länsvisa uppskattningar hänvisas till bilaga 1.

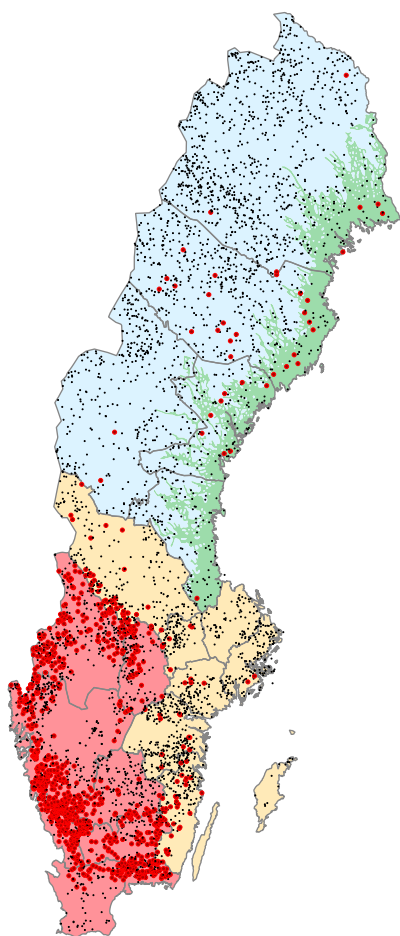
Tabell 6. Andel försurade sjöar i Sverige beräknat genom destratifiering av 5 084 sjöar inom Sjöomdrevet 2007–2012 och bedömda med MAGIC_{bibliotek} version 9. Kalkade sjöar har bedömts efter korrigering för kalkningspåverkan.

Landsdel	Andel försurade sjöar (%)			
	1990	2010	2020	2030
Norrlands inland	8	2	1	1
Norrland under HK	17	9	8	8
Östra och mellersta Sverige	15	9	9	7
Sydvästra Sverige	57	47	45	45
Hela Sverige	17	10	10	9

Uppskattningen av andelen försurade sjöar i Sverige baserar sig på ett stratifierat urval av cirka 5 % av alla sjöar. Det slumpvisa fel som beror på att bedömningen görs utifrån ett statistiskt urval av alla sjöar kan beräknas genom en så kallad Monte Carlo-simulering för att beräkna ett konfidensintervall för andelen försurade sjöar. För hela Sverige ligger enligt sådana beräkningar andelen försurade sjöar mellan 9,5 och 11,0 %. Detta är den säkraste uppskattningen hittills och baserar sig på dubbelt så många sjöar som den förra uppskattningen då intervallet låg mellan 8,9 och 11,2 % (Fölster m.fl. 2012).

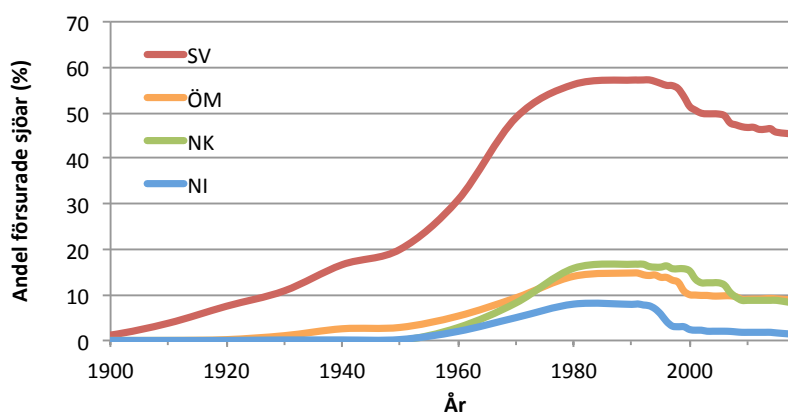
Tabell 7. Konfidensintervall för andel försurade sjöar i Sverige 2010

Landsdel	Andel försurade sjöar (%)
	Konfidensintervall
Norrlands inland	1,0–2,5
Norrland under HK	5,4–12,8
Östra och mellersta Sverige	6,8–11,7
Sydvästra Sverige	44,3–48,9
Hela Sverige	9,5–11,0

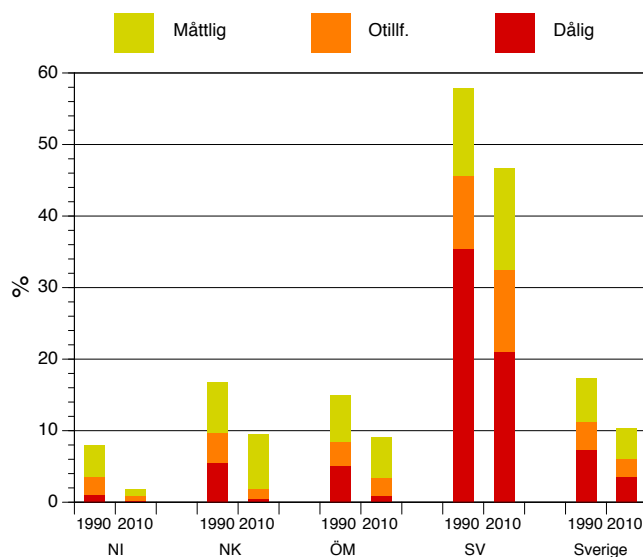


Figur 7. Försurade (röda) och oförsurade (svarta) sjöar i Sverige 2010 med indelning i landsdelar utifrån länsgränser och försurningspåverkan. Kalkade sjöar är bedömda utifrån beräknad okalkad kemi.

Med hjälp av MAGIC_{bibliotek} kan försurningsutvecklingen beskrivas för hela tidsperioden sedan 1860 i de olika landsdelarna (Figur 8). Relativt sett är återhämtningen störst i norra samt östra och mellersta Sverige där försurningspåverkan varit minst. I dessa regioner har antalet försurade sjöar mer än halverats. I den mest försurade sydvästra delen av Sverige har den relativa andelen försurade sjöar minskat betydligt mindre. Om man istället tittar på fördelningen på de olika statusklassningarna ser man att det framför allt är andelen av den sämsta försurningsklassen som minskat sedan 1990 (Figur 9). Här ser vi en omfattande återhämtning även i sydvästra Sverige, även om återhämtningen inte är fullständig.



Figur 8. Utvecklingen av andel försurade sjöar 1900–2030 i fyra regioner i Sverige baserat på data från Sjöomdrevet 2007–2012 och MAGICbibliotek.



Figur 9. Andelen sjöar i olika försurningsklasser 1990 och 2010 i fyra regioner i Sverige baserat på data från Sjöomdrevet 2007–2012 och MAGICbibliotek.

Kalkningen är den största enskilda miljövårdsåtgärden i Sverige baserat på kostnaden och antal sjöar som berörs. Baserat på kalkningsuppgifter inom avrinningsområdena inom omdrevets sjöar påverkas 7,8 % av Sveriges sjöar av kalkning. Antingen genom direkt kalkning i sjön eller genom kalkning i uppströms liggande sjöar, vattendrag eller myrar. En del av dessa har bedömts som försurade och utgör målsjöar för kalkningsverksamheten, en del kalkas enbart för nedströms effekt medan andra bara råkar ligga nedströms områden med kalkning och påverkas oavsiktligt. Andelen kalkningspåverkade sjöar är en viss minskning sedan förra utvärderingens 10 %. Minskningen kan förklaras av att den nya bedömningen baseras på aktuella kalkningsdata och att kalkningen minskat på senare år.

För uppskattningen av andelen försurade sjöar bedöms de kalkade sjöarna utifrån en beräknad okalkad kemi. Av de kalkningspåverkade sjöarna skulle 44 % inte vara försurade även om kalkningen upphörde (Tabell 8). Den största andelen icke försurade kalkningspåverkade sjöar återfanns i Norrland, c. 75 %. Icke försurade kalkningspåverkade sjöar kan utgöras av felaktigt kalkade sjöar, men också av sjöar som kalkas för nedströms effekt eller sjöar som oavsiktligt påverkats av uppströms kalkning.

Tabell 8. Andel (i procent) försurade och kalkade sjöar i Sverige 2010.

Landsdel	Opåverkat	Kalkat ej försurat	Kalkat försurat	Okalkat försurat
Norrlands inland	98	0,6	0,2	1,6
Norrland under HK	84	7,6	2,2	7
Östra och mellersta Sverige	87	3,8	1,7	7
Sydvästra Sverige	41	12	25	22
Hela Sverige	86	3,4	4,4	6

Felkällor i försurningsberäkningarna av försurning

Jämförelse med paleolimnologi

MAGIC är en geokemisk modell med vilken man kan beräkna det förindustriella vattenkemiska tillståndet. Någon direkt validering kan inte göras eftersom det saknas tillförlitliga mätdata från den tiden. Istället har modellen validerats genom en jämförelse med en paleolimnologisk rekonstruktion av förindustriellt pH utifrån sammansättningen av kiselalger i sjösediment (Erlandsson m.fl. 2008a). Jämförelsen visar på en relativt god jämförelse i genomsnitt, men den beror på antaganden om TOC-halt och kolsyratryck. En tidigare utvärdering visades att MAGIC_{bibliotek} i genomsnitt ger en 0,1 pH-enheter högre försurningspåverkan jämfört med paleolimnologi (Fölster m.fl. 2012). Om man antar att paleolimnologi i genomsnitt ger en korrekt beskrivning av försurningen och korregerar bedömningen av tillståndet i Sveriges sjöar för en avvikelse på 0,1 pH-enhet minskar försurningen till 8 % av Sveriges sjöar. I Norrlands inland, där många av de sjöar som klassades som försurade hade en pH-förändring strax över 0,4 pH-enheter, halveras andelen försurade sjöar med en sådan korrigering. Även försurningen 1990 blir lägre med detta sätt att räkna – 13 % för hela Sverige i stället för 17 %.

Överskattning av svaveldepositionen i MAGIC

I modelleringarna med MAGIC används data för svaveldepositionen från EMEP ("European Monitoring and Evaluation Programme" inom luftvårdskonventionen). Data bygger på rekonstruktioner av historisk deposition från uppgifter om industriaktiviteter, modellerad deposition baserat på mätningar från senare tid samt prognoser för framtida deposition (Figur 1). Depositionen är angiven som medelvärden för rutor med storleken 50x50 km. För enskilda sjöar avviker den verkliga depositionen från detta medelvärde på grund av avrinningsområdets topografi och marktäcke. I MAGIC-modelleringen löste man detta genom att för varje sjö skala om EMEP-

depositionen för rutan utifrån den uppmätta sulfathalten i sjön (Moldan m.fl. 2013). Man antar då att dagens sulfathalt i sjön är i jämvikt med dagens deposition och att det inte finns någon naturlig källa av sulfat i marken. Bara i ett fåtal fall där den uppmätta halten gav dubbelt så hög deposition som medelvärde för rutan gjordes en korrigering för en eventuell bakgrund. Båda dessa antaganden riskerar att ge en överskattning av försurningspåverkan. Data från trendsjöarna visar att sulfathalten i vattnet för närvarande minskar mer än depositionen och att det därmed inte är jämvikt mellan in- och utflöde utan ett nettoläckage av sulfat. Budgetstudier från IM-områden i norra Europa visar också på att utläckaget av svavel idag är större än depositionen (Kleemola m.fl. 2013). Förekomst av naturligt sulfat från marken kan förekomma under högsta kustlinjen där svavel finns lagrat i sedimentära jordar. Det kan också förekomma i mindre mängder inblandat i moränen som sulfidmineraler. I de tidigare bedömningsgrunderna beräknades ett bakgrundsläckage av sulfat från halten baskatjoner (Naturvårdsverket 1999). I de nuvarande bedömningsgrunderna antogs underlaget för att uppskatta bakgrundshalten av svavel inte tillräckligt bra och sattes därför till noll.

Båda dessa antaganden, jämvikt av sulfat mellan deposition och sjövattnet vid kalibreringstillfället samt att sulfatvittringen satts till noll, leder till en överskattning av den totala depositions påverkan och därmed även försurningspåverkan. Risken för överskattning av försurningen är störst där depositionen idag är låg och eventuella andra källor till svavel därmed får en större relativ betydelse. En bättre uppskattning av nutida deposition och bakgrundsläckage i sjöar med tidsseriemätningar skulle kunna åstadkommas genom en enkel modell baserad på data för deposition och vattenkemi (Köhler m.fl. 2011).

Koldynamik

Halten organiskt kol (TOC) har ökat avsevärt de senaste decennierna vilket har satts i samband med den minskande svaveldepositionen (Monteith m.fl. 2007). Genom en ny paleolimnologisk metod som omfattar en spektralanalys av sedimentet (NIRS) kan halten TOC i sjövattnet vid en viss tidpunkt bestämmas (Cunningham m.fl. 2011). En rekonstruktion av historiskt TOC i ett antal sjöar bekräftar hypotesen och visar att dagens förbruning är en återgång till ett naturligt brunare tillstånd än under försurningens maximum (Valinia m.fl. 2012). Eftersom det hittills saknats möjlighet att beskriva den historiska förändringen av organiskt material för alla sjöar sattes halten till en konstant för hela perioden motsvarande det uppmätta värdet för kalibreringsåret i MAGIC-modelleringarna för MAGIC_{bibliotek}. Denna förenkling kan innebära en avsevärd överskattning av försurningen om man antar att allt organiskt kol kommer från den bäcknära zonen (Erlandsson m.fl. 2011). Om man istället antar att en avgörande del av kolet kommer från marken i hela avrinningsområdet påverkas även halterna av andra ämnen i vattnet vilket gör att betydelsen för försurningsbedömningen inte blir lika stor (Hruška m.fl. 2014). Det pågår omfattande forskning inom området och inom de kommande åren kommer förhoppningsvis möjligheterna vara bättre för att ta hänsyn till förändringen av TOC i försurningsbedömningen.

Vattendrag

För vattendrag saknas det någon slumpmässig provtagning som kan ge underlag för en uppskattning av andelen försurad rinnsträcka i Sverige. I stället beräknas den genom en omskalning av resultaten från omdrevssjöarna med antagandet att höstprover av kemi i sjöar i en viss storleksklass med avseende på avrinningsområden och i en viss EMEP-ruta (50x50 km), representerar den flödesvägda vattenkemin i vattendrag i samma gruppering (Fölster m.fl. 2011a). Beräkningen ger att 14 % av alla vattendrag är försurade varav mindre än hälften är kalkade (Tabell 9). Om man istället begränsar andelen rinnsträcka till dem med avrinningsområden $> 2 \text{ km}^2$, är bara 12 % av rinnsträckan försurad. En sådan avgränsning motiveras av att vattendrag $< 2 \text{ km}^2$ sällan är permanent vattenförande. Med den avgränsningen är 75 % av de försurade vattendragen kalkade.

Tabell 9. Andelen försurad rinnsträcka beräknad genom omskalning av resultat från Sjöomdrevet 2007-2012.

	$< 2 \text{ km}^2$	$> 2 \text{ km}^2$	Alla vattendrag
Opåverkade	81	82	81
Kalkad, ej försurad	3	6	4
Kalkad, försurad	5	9	6
Ej kalkad, försurad	11	3	8

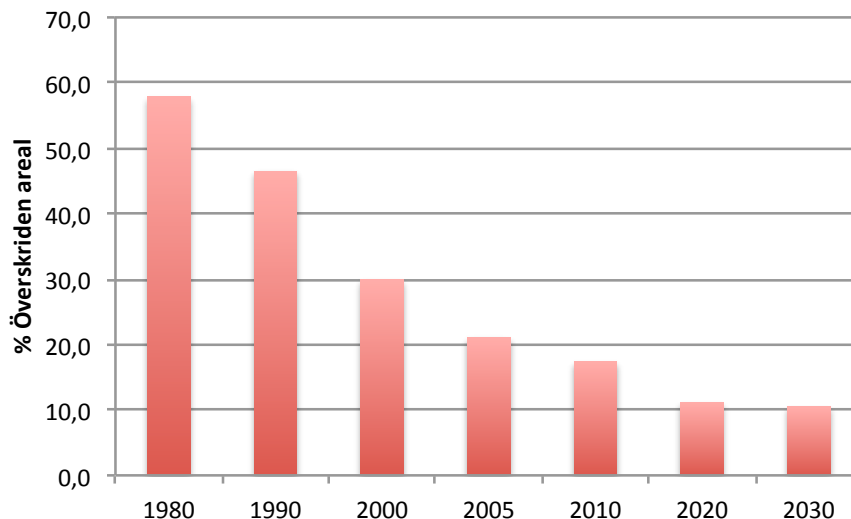
Bedömningen av andel försurad rinnsträcka baserad på sjökemi ska användas med stor försiktighet. Ett visst stöd för antagandet att sjökemi kan representera ett flödesvägt medelvärde av vattendragskemi i samma område finns beskrivet i en rapport av (Fölster m.fl. 2007). Undantaget är att halten naturligt organiskt kol (TOC) i genomsnitt är högre i vattendrag eftersom det sker en nedbrytning av TOC i sjöar. Högre halter av TOC ger lägre pH-värden vilket i sin tur kan göra vattendragen mer försurningskänsliga. Skillnaden mellan sjöar och vattendrag dämpas dock av att de flesta vattendragen ofta har sjöar inom sina avrinningsområden, men en risk för underskattning av andelen försurad rinnsträcka kan inte uteslutas.

Ett annat problem utgör den stora variationen i vattenkemin i vattendrag. När depositionen var hög drabbade försurningen Norrland främst vattendrag under vårfloden då vattnet redan naturligt är surt och därmed extra känsligt (Laudon m.fl. 2001). Tillskottet av svavelsyra från den smältande snön sänkte pH-värdet ytterligare och orsakade försurning. När depositionen minskade kraftigt på 1990-talet upphörde stora delar av episodförsurningen. Försurningsepisoder kan även förekomma vid andra typer höglöden, efter torka och efter kraftig deposition av havssalt. En forskningsstudie visar dock att olika typer av försurningsepisoder, det vill säga tillfällig ökning av den antropogen försurningen i samband med en naturligt sur episod, främst förekommer i vattendrag som redan klassas som försurade baserat på det flödesvägda medelvärdet (Erlandsson m.fl. 2010). Risken är därmed inte så stor att man felklassar försurade vattendrag om man gör det utifrån det flödesvägda medelvärdet.

Överskridande av kritisk belastning

Den andra preciseringen av miljömålet innebär att den kritiska belastningen för försurning inte ska överskridas i någon del av landet. Med kritisk belastning menas hur mycket deposition av försurande svavel och kväve som ekosystemet kan motstå på lång sikt utan skador på levande organismer. I Sverige har kriteriet för skador satts till en förändring av pH på 0,4 enheter jämfört med tillståndet 1860 beräknat med MAGIC, det vill säga samma kriterium som för försurning enligt bedömningsgrunderna. Dataunderlaget för beräkningarna av kritisk belastning är samma 5 084 omdrevssjöar som för beräkningen av andelen försurade sjöar. Beräkningsmetoden är en modifierad variant av den så kallade FAB-modellen (Moldan m.fl. 2014). Modifieringarna innebär bland annat att en del av data hämtas från MAGIC_{bibliotek} och att större hänsyn tas till kvävet immobilisering. Dessutom definieras jämviktstillståndet med avseende på halten baskatjoner som tillståndet år 2100 enligt MAGIC i stället för det beräknade tillståndet år 1860 som tidigare användes. Överskridandet beräknas som andel av Sveriges yta eftersom sjöarnas avrinningsområde är en del av sjöekosystemen. De nio största sjöarna, som är välbuffrade, är borträknade från arealen.

Överskridandet kan beräknas för depositionen för olika år för att visa på hur belastningen på ekosystemet har minskat. När depositionen var som störst 1980 var den kritiska belastningen överskriden på 58 % av Sveriges areal. Det innebär att om inget hade gjorts för att minska utsläppen hade sjöarna i mer än hälften av Sveriges yta blivit försurade på lång sikt. År 2010 var överskridandet nere på 17 % och om beslutade åtgärder genomförs kommer den överskridna arealen vara nere på 11 % år 2020 (Figur 10). Beräkningarna visar visserligen en stor förbättring jämfört med 1980-talet, men de visar också på att det inte kommer bli någon ytterligare återhämtning från försurningen av betydelse efter 2020.

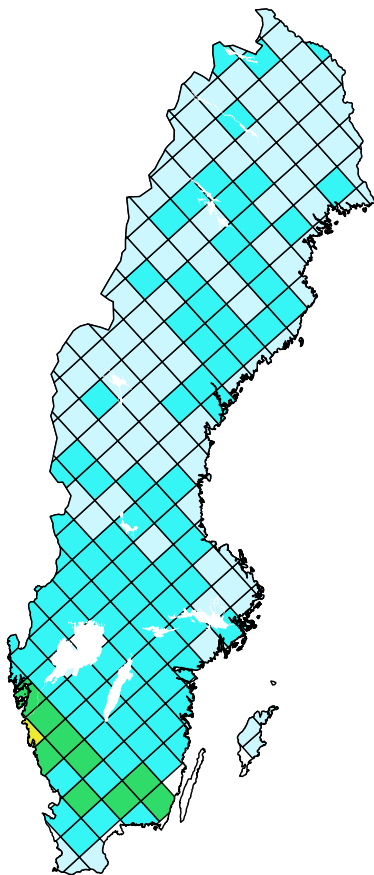


Figur 10. Andel av Sveriges yta med överskridande av kritisk belastning för försurning av sjöar med deposition för olika år.

I den förra fördjupade utvärderingen angavs överskridandet 2020 till 19 %. Skillnaden mot dessa beräkningar är att man då räknade med försurningspåverkan från dagens skogsbruk och en prognos för framtidens skogsbruk. I de beräkningar som

presenteras här användes i stället bara påverkan från stamvedsuttag, det vill säga utan hänsyn till uttag av grenar och toppar för biobränsle. Skillnaden i de två beräkningarna visar på hur stor betydelse skogsbruket har för försurningsberäkningarna i dagsläget när depositionen är så låg. Betydelsen av skogsbruket för beräkningen av kritisk belastning finns beskriven i en särskild utvärdering (Moldan m.fl. 2014).

En karta över den rumsliga fördelningen av överskridandet visar att det största överskridandet 2020 kommer vara i södra och sydvästra Sverige (Figur 11). Kartan visar också på ett överskridande i enskilda rutor över hela Sverige även om det är mycket lågt, < 50 ekv/ha år. Klassningen i kartan bygger på beräkningar av ett genomsnittligt överskridande som används av EMEP (Average Accumulated Exceedence) där man bildar ett medelvärde av överskridandet för sjöarna inom en ruta och där värdet sätts till 0 om det inte är något överskridande. Det gör att om en sjö har ett mycket lågt överskridande blir det ett visst överskridande för hela rutan även om de övriga sjöarna ligger långt under ett överskridande. Detta tillsammans med att slumpmässiga fel i modellen kan ge ett överskridande i enstaka sjöar gör att det är rimligt att nedtona betydelsen av överskridande 0–50 ekv/ha.



Figur 11. Överskridande av kritisk belastning för sjöar 2020 enligt prognos som baserar sig på att fattade beslut genomförs (CLE). Klassning visar det genomsnittliga överskridandet för rutan i ekv/ha år (Average accumulated exceedence).

När når vi målet?

Trenderna i vattenkemin visar på en återhämtning från försurningen i södra Sverige där försurningspåverkan varit störst. I sydvästra Sverige fortgår återhämtningen med oförminskad kraft trots att depositionsminskningen sedan länge klingat av. Allt fler sjöar som varit försurade får pH-värden som gör att försurningskänsliga organismer kan klara sig. Även biologiska mätdata visar på ökad biodiversitet som är kopplad till minskad försurning. Som kontrast mot denna positiva bild står att 10 % av Sveriges sjöar fortfarande är försurade och enligt MAGIC-modellering kommer den fortsatta återhämtningen att vara marginell. Även överskridandet av den kritiska belastningen, som bara kommer gå ner till 10 % till 2030, visar att det inte kommer ske någon fullständig återhämtning av alla Sveriges sjöar även om depositionen gått ner till vad den var för 100 år sedan.

Den viktigaste orsaken till att återhämtningen inte förväntas bli fullständig är att skogsbrukets bortförsel av baskatjoner överskrider vittringen enligt tillgängliga budgetstudier baserat på markinventeringsdata (Akselsson m.fl. 2007). Med ett intensifierat skogsbruk med uttag av grenar, toppar och stubbar för biobränsle riskeras till och med en ökad försurning enligt beräkningarna. Även en finsk modelleringsstudie visar på ökad försurning med ett intensifierat skogsbruk (Aherne m.fl. 2012). Samtidigt som dessa modelleringsresultat måste tas på allvar får man komma ihåg att det saknas empiriska bevis för försurning av ett intensifierat skogsbruk (Thiffault m.fl. 2011). Uppskattningarna av markens naturliga tillförsel av baskatjoner genom vittring av mineraler innehåller stora osäkerheter (Klaminder m.fl. 2011). Träden kan också anpassa sitt upptag av kalcium till tillgången vilket gör att skogsbrukets försurning kan minska när markförsurningen fortgår (van der Heijden m.fl. 2014). Dessutom innebär den minskade svaveldepositionen att det finns lägre halter mobila anjoner som kan transportera vätejoner och aluminium från markens övre lager till grundvattnet och vidare ut till ytvattnet (Reuss m.fl. 1986). Kopplingen mellan försurningen av marken i övre delar av avrinningsområdena blir därmed mindre jämfört med när svaveldepositionen var större (Löfgren m.fl. 2014). Även försök med kalkning av skogsmark visar på svag koppling mellan fastmarkens surhetstillstånd och ytvattnet (Löfgren m.fl. 2008).

Om de modeller som miljömålet baserar sig på ger en rättvis beskrivning av utvecklingen framöver kommer miljömålet Bara naturlig försurning inte att kunna uppnås, även om depositionen minskar till nivån vid 1860. Det kommer alltid finnas ett visst överskridande av kritisk belastning för cirka en tiondel av Sveriges yta och ungefär lika stor andel av Sveriges sjöar kommer vara försurade. Det kan till och med bli en ökad försurning. Man frågar sig då om det är ändamålsenligt att ha ett miljömål som baserar sig på tillståndet 1860. Det är naturligtvis viktigt att visa på att det skett en irreversibel skada på ekosystemet genom 1900-talet svavelutsläpp, men ett mål som inte kan uppnås kan leda till att varje förbättringsåtgärd upplevs som meningslös och inte värt att lägga resurser på. Ett alternativt mål skulle kunna vara det bästa tillstånd som kan uppnås om vi upphör med alla försurande utsläpp (Best Attainable Condition) (Stoddard m.fl. 2006). Modellerna skulle då kunna användas för att beräkna ett sådant tillstånd som kan tjäna som referens inom vattenförvaltningen och övrigt miljövårdsarbete mot vilket miljövården ska

sträva. Samtidigt kan beräkningen av det förindustriella tillståndet användas för att visa på den irreversibla skada som uppstått på grund av försurningen.

Kunskapsbehov

Det är nödvändigt att fortsätta att följa upp den fortsatta utvecklingen genom miljöövervakning både av vattenkemi, markkemi och biologiska parametrar. Dessutom behövs forskning inom följande områden:

- De senaste decennierna har halten naturligt organiskt material (TOC) ökat i många ytvatten. Eftersom TOC innehåller organiska syror påverkar det surheten och därmed försurningsbedömningen. Trenden anses delvisa vara en effekt av den minskande försurningen, men klimatets variation spelar också roll. Ett förändrat klimat förutspås ge ytterligare ökning av TOC vilket påverkar vilket tillstånd som är möjligt att uppnå. Det behövs därför mer forskning kring vilka faktorer som styr halten organiskt kol i ytvattnet. Behovet omfattar även förståelse för vilka delar av avrinningsområdet som utgör källan för TOC till ytvattnet eftersom det styr sambandet mellan TOC och andra parametrar.
- Kunskapen om naturliga bakgrundshalter för svavel behöver ökas för att ge realistiska förväntningar för återhämtningens slutpunkt och för att ge säkrare modellering av referenstillstånd och prognoser.
- Uppskattningen av deposition, växtupptag och markförråd av baskatjoner behöver förbättras.
- En ökad kunskap om kolets och svavlets dynamik behöver implementeras i de geokemiska modeller som används för beräkning av försurning och överskridande av kritisk belastning.
- Den biologiska försurningens betydelse för ytvattnets kvalitet behöver beskrivas bättre för att klargöra om skogsbruket utgör ett långsiktigt hot mot vattenkvaliteten eller inte.
- En fördjupad statistisk analys av biologiska data kan öka möjligheten att se signifikant biologisk återhämtning genom att filtrera bort andra faktorer som styr artsammansättningen.
- Modelleringsarbetet behöver kompletteras med prognoser för olika scenarier för att visa på vilken vattenkvalitet som är teoretiskt möjligt att uppnå.
- Det behövs en ämnesövergripande diskussion för att ta fram miljömål som är möjliga att uppnå utan att det innebär en sänkt ambitionsnivå.

Referenser

- Aherne, J., M. Posch, M. Forsius, A. Lehtonen och K. Härkönen (2012). "Impacts of forest biomass removal on soil nutrient status under climate change: a catchment-based modelling study for Finland." *Biogeochemistry* **107**(1-3): 471-488.
- Akselsson, C., O. Westling, H. Sverdrup, J. Holmqvist, G. Thelin, E. Uggla och G. Malm (2007). "Impact of Harvest Intensity on Long-Term Base Cation Budgets in Swedish Forest Soils." *Water, Air, & Soil Pollution: Focus* **7**(1-3): 201-210.
- Angeler, D. G. och R. K. Johnson (2012). "Temporal scales and patterns of invertebrate biodiversity dynamics in boreal lakes recovering from acidification." *Ecol Appl* **22**(4): 1172-1186.
- Cunningham, L., K. Bishop, E. Mettavanio och P. Rosen (2011). "Paleoecological evidence of major declines in total organic carbon concentrations since the nineteenth century in four nemoboreal lakes." *Journal of Paleolimnology* **45**(4): 507-518.
- Erlandsson, M., K. Bishop, J. Fölster, M. Guhren, T. Korsman, V. Kronnas och F. Moldan (2008a). "A comparison of MAGIC and paleolimnological predictions of preindustrial pH for 55 Swedish lakes." *Environmental Science & Technology* **42**(1): 43-48.
- Erlandsson, M., I. Buffam, J. Fölster, H. Laudon, J. Temnerud, G. A. Weyhenmeyer och K. Bishop (2008b). "Thirty-five years of synchrony in the organic matter concentrations of Swedish rivers explained by variation in flow and sulphate." *Global Change Biology* **14**(5): 1191-1198.
- Erlandsson, M., N. Cory, J. Fölster, S. Köhler, H. Laudon, G. A. Weyhenmeyer och K. Bishop (2011). "Increasing Dissolved Organic Carbon Redefines the Extent of Surface Water Acidification and Helps Resolve a Classic Controversy." *Bioscience* **61**(8): 614-618.
- Erlandsson, M., H. Laudon och J. Fölster (2010). "Spatiotemporal patterns of drivers of episodic acidification in Swedish streams and their relationships to hydrometeorological factors." *Science of the Total Environment* **408**(20): 4633-4643.
- Franzén, L. G. (1990). "Transport, deposition and distribution of marine aerosols over southern Sweden during dry westerly storms." *Ambio* **19**(4): 180-188.
- Futter, M. N., A. Valinia, S. Löfgren, S. L. Köhler och J. Fölster (2014). "Long term (1987–2012) trends in water chemistry of acid sensitive Swedish lakes show slow recovery from historic acidification." *Ambio*.
- Fölster, J., S. Hallstan och R. K. Johnson (2014a). Utvärdering av de nationella miljöövervakningsprogrammen av sjöar
- Trendsjöar och Sjöomdrev. SLU, Vatten och miljö: Rapport 2014:3.
- Fölster, J., R. K. Johnson, M. N. Futter och A. Wilander (2014b). "The Swedish monitoring of surface waters: 50 Years of adaptive monitoring." *Ambio*: 1-13.
- Fölster, J. och S. Köhler (2011a). Försurningsläget i Sveriges ytvatten 2010
- Trender i vattenkemi samt bedömning av försurning och överskridande av kritisk belastning av försurande ämnen för ytvatten i Sverige. Underlag till utvärdering av miljömålet "Bara naturlig försurning. Rapport 2011:24, Institutionen för vatten och miljö, SLU.
- Fölster, J., S. Köhler, C. von Brömssen, C. Akselsson och P. Rönnback (2011b). Korrigering av vattenkemi för kalkningspåverkan - val av referenser och beräkning av osäkerheter. Institutionen för vatten och miljö, SLU. Rapport 2011:1.
- Fölster, J., J. Temnerud och M. Erlandsson (2007). Surhet och försurning i vattendrag i ett variabelt landskap. Institutionen för Miljöanalys, SLU. Rapport 2007:15.
- Fölster, J. och S. Valinia (2012). Försurningsläget i Sveriges ytvatten 2010

- Komplettering till rapport 2011:24. Underlag till utvärdering av miljömålet "Bara naturlig försurning. Rapport 2012:5, Institutionen för vatten och miljö, SLU.
- Grandin, U. (2007). "Strategier för urval av sjöar som ska ingå i den sexåriga omdrevsinventeringen av vattenkvalitet i svenska sjöar. Rapport 2007:10. Institutionen för Miljöanalys, SLU."
- Holmgren, K. (2014). "Challenges in assessing biological recovery from acidification in Swedish lakes " *Ambio*.
- Hruška, J., P. Krám, F. Moldan, F. Oulehle, C. Evans, R. Wright, J. Kopáček och B. Cosby (2014). "Changes in Soil Dissolved Organic Carbon Affect Reconstructed History and Projected Future Trends in Surface Water Acidification." *Water, Air, & Soil Pollution* **225**(7): 1-13.
- Johnson, R. K. och D. G. Angeler (2010). "Tracing recovery under changing climate: response of phytoplankton and invertebrate assemblages to decreased acidification." *Journal of the North American Benthological Society* **29**(4): 1472-1490.
- Klaminder, J., R. W. Lucas, M. N. Futter, K. H. Bishop, S. J. Köhler, G. Egnell och H. Laudon (2011). "Silicate mineral weathering rate estimates: Are they precise enough to be useful when predicting the recovery of nutrient pools after harvesting?" *Forest Ecology and Management* **261**(1): 1-9.
- Kleemola, S. och M. Forsius (2013). 22nd Annual Report 2013. Convention on Long-range Transboundary Air Pollution. International Cooperative Programme on Integrated Monitoring of Air Pollution Effects on Ecosystems, Finnish Environmental Institute: 60.
- Korsman, T. (1999). "Temporal and spatial trends of lake acidity in northern Sweden." *Journal of Paleolimnology* **22**(1): 1-15.
- Köhler, S. och J. Fölster (2011). Granskning och dokumentation av bedömningsgrunder för försurning - MAGIC-modellering. Rapport 2011:23, Institutionen för vatten och miljö, SLU.
- Laudon, H., O. Westling, A. B. S. Poléo och L. A. Völlestad (2001). *Naturligt sura och försurade vatten i Norrland*. Naturvårdsverket. Rapport 5144.
- Lucas, R. W., R. A. Sponseller och H. Laudon (2013). "Controls Over Base Cation Concentrations in Stream and River Waters: A Long-Term Analysis on the Role of Deposition and Climate." *Ecosystems* **16**(5): 707-721.
- Löfgren, S., J. P. Gustafsson och U. Skjölberg (2014). How does forest biomass production acidify soil and surface waters in comparison with mineral acids? Report to SEPA.
- Löfgren, S., T. Zetterberg, P.-E. Larsson, C. Neil, M. Klarqvist, V. Kronnäs och L.-O. Lång (2008). *Kogsmarkskalkningens effekter på kemin i mark, grundvatten och ytvatten i SKOKAL-områdena 16 år efter behandling*. Jönköping: Skogsstyrelsens förlag. (Rapport / Skogsstyrelsen, 2008:16).
- Moldan, F., B. Cosby och R. Wright (2013). "Modeling Past and Future Acidification of Swedish Lakes." *AMBIO* **42**(5): 577-586.
- Moldan, F., J. Stadmark, S. Jutterström, J. Fölster och M. N. Futter (2014). Test av dynamisk modell för beräkningar av skogsbrukets påverkan på kritisk belastning för försurning av sjöar.
- Monteith, D. T., J. L. Stoddard, C. D. Evans, H. A. de Wit, M. Forsius, T. Hogasen, A. Wilander, B. L. Skjelkvale, D. S. Jeffries, J. Vuorenmaa, B. Keller, J. Kopacek och J. Vesely (2007). "Dissolved organic carbon trends resulting from changes in atmospheric deposition chemistry." *Nature* **450**(7169): 537-U539.
- Naturvårdsverket (1985). *Monitor 1985. PMK: På vakt i naturen*, Naturvårdsverket.
- Naturvårdsverket (1999). *Bedömningsgrunder för Miljökvalitet. Sjöar och vattendrag. Rapport 4913*. Uppsala.

- Naturvårdsverket (2007). "Bedömningsgrunder för sjöar och vattendrag. Bilaga A till Handbok 2007:4."
- Naturvårdsverket (2012). Steg på vägen. Fördjupad utvärdering av miljömålen 2012. Rapport 6500.
- Rask, M., M. Appelberg, T. Hesthagen, U. Beier och A. Lappalainen (2000). Fish status survey of nordic lakes. Species composition, distribution, effects of environmental changes. TemaNord edn. Nordic Council of Ministers, Copenhagen.
- Reuss, J. O. och D. W. Johnson (1986). Acid deposition and the acidification of soils and water. New York, Springer Verlag.
- Spens, J. och J. P. Ball (2008). "Salmonid or nonsalmonid lakes: predicting the fate of northern boreal fish communities with hierarchical filters relating to a keystone piscivore." Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences **65**(9): 1945-1955.
- Stoddard, J. L., D. S. Jeffries, A. Lükewille, T. A. Clair, P. J. Dillon, C. T. Driscoll, M. Forsius, M. Johannessen, J. S. Kahl, J. H. Kellogg, A. Kemp, J. Mannio, D. T. Monteith, P. S. Murdoch, S. Patrick, A. Rebsdorf, B. L. Skjelkvåle, M. P. Stainton, T. Traaen, H. van Dam, K. E. Webster, J. Wieting och A. Wilander (1999). "Regional trends in aquatic recovery from acidification in North America and Europe." Nature **401**(6753): 575-578.
- Stoddard, J. L., D. P. Larsen, C. P. Hawkins, R. K. Johnson och R. H. Norris (2006). "Setting expectations for the ecological condition of streams: The concept of reference condition." Ecological Applications **16**(4): 1267-1276.
- Thiffault, E., K. D. Hannam, D. Paré, B. D. Titus, P. W. Hazlett, D. G. Maynard och S. Brais (2011). "Effects of forest biomass harvesting on soil productivity in boreal and temperate forests — A review." Environmental Reviews **19**(NA): 278-309.
- Valinia, S., G. Englund, F. Moldan, M. N. Futter, S. J. Köhler, K. Bishop och J. Fölster (2014). "Assessing anthropogenic impact on boreal lakes with historical fish species distribution data and hydrogeochemical modeling." Global Change Biology: n/a-n/a.
- Valinia, S., H. P. Hansen, M. N. Futter, K. Bishop, N. Sriskandarajah och J. Fölster (2012). "Problems with the reconciliation of good ecological status and public participation in the Water Framework Directive." Science of the Total Environment **433**: 482-490.
- van der Heijden, G., A. Legout, B. Pollier, J. Ranger och E. Dambrine (2014). "The dynamics of calcium and magnesium inputs by throughfall in a forest ecosystem on base poor soil are very slow and conservative: evidence from an isotopic tracing experiment (26Mg and 44Ca)." Biogeochemistry **118**(1-3): 413-442.
- Velle, G., R. J. Telford, C. Curtis, L. Eriksson, A. Fjellheim, M. Frolova, J. Fölster, N. Grudule, G. A. Halvorsen, A. Hildrew, A. Hoffmann, I. Indriksone, L. Kamasová, J. Kopáček, S. Orton, P. Krám, D. T. Monteith, T. Senoo, E. M. M. Shilland, E. Stuchlík, M.-L. Wiklund, H. de Wit och B. L. Skjelkvaale (2013). Biodiversity in freshwaters: temporal trends and response to water chemistry. ICP Waters report 114/2013.

Bilaga 1. Länsvis beskrivning av andel försurade och kalkade sjöar. Baserat på Sjöomdrevet 2007-2012 och MAGICbibliotek version 9.

Län	Landsdel	Anal sjöar i undersökningen	Opåverkat	Kalkat ej försurat	Kalkat försurat	Okalkat försurat	
AC	Norrländ	462	90	3	0	7	
BD		915	99	0	0	1	
X		116	93	7	0	0	
Y		124	86	7	6	1	
Z		327	99	0	0	1	
AB	Östra och mellersta Sverige	136	98	0	0	2	
C		67	100	0	0	0	
D		96	90	4	1	4	
E		265	91	4	1	4	
H		173	78	5	4	14	
I		12	100	0	0	0	
U		128	82	11	3	4	
W		271	85	3	2	10	
F		Sydvästra Sverige	219	60	14	17	9
G			207	39	6	23	32
K	112		23	15	40	21	
M	94		53	5	15	27	
N	294		21	6	39	34	
O	542		45	8	26	21	
S	358		37	21	21	21	
T	166		52	16	20	11	
Hela Sverige		5084	86	3	4	6	